

Estudio y dimensionamiento del sistema de generación y distribución de vapor en un buque tipo.

Trabajo final de grado



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Trabajo realizado por:
Ramon Caballé Planas

Dirigido por:
Ignacio Echevarrieta Sazatornil

Grado en Tecnologías Marianas

Barcelona, 05/07/2019

Departamento de Ciencia e Ingeniería Náutica



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Facultat de Nàutica de Barcelona

Agradecimientos

A todos aquellos que me han ayudado siempre. A mi familia y amigos por confiar en mí y mis aptitudes, sin ellos habría sido imposible llegar hasta aquí. Una mención especial, también, para mi tutor del trabajo Ignacio Echevarrieta por la rigurosidad y profesionalidad durante toda la tutorización del trabajo. Durante la redacción del trabajo he podido plasmar mis conocimientos adquiridos durante estos años y he visto que en general, sabemos más de lo que pensamos, sólo hace falta realizar las cosas con interés y ahínco. Por último, gracias también a todos los compañeros de la Facultad de Náutica de Barcelona.

Resumen

Existen tres principios principales de transmisión de calor en los generadores de vapor que son: conducción, convección y radiación. La transformación del fluido (agua) en gas (vapor) en un generador de vapor se puede entender, definir técnicamente y estudiar gracias a conocer dichos tres principios.

Un generador de vapor o caldera es un aparato que transforma la energía química (producida por la combustión de algún tipo de combustible) en energía térmica que sirve para calentar un fluido térmico. Se puede definir fluido térmico como aquel fluido que se utiliza para intercambiar calor, en el caso de los generadores de vapor el fluido térmico utilizado es agua. Es importante conocer técnicamente como funciona una caldera y a la vez conocer los principios físicos que tienen lugar durante el proceso de funcionamiento, para poder realizar un buen estudio con visión general de un sistema de generación y distribución de vapor.

En el presente trabajo se realiza un estudio detallado del vapor necesario que necesita un buque tipo, en este caso un petrolero. Este estudio está basado en los máximos es decir, el vapor que necesitará este tipo de barco en las condiciones de consumo máximo. La otra cara importante del trabajo es el cálculo de pérdidas de calor que tienen los tanques del buque. Estos cálculos se han realizado mediante las fórmulas básicas de transmisión de calor y teniendo en cuenta la geometría de los tanques.

Para asegurar un dimensionamiento seguro de qué tipo de generador de vapor necesita el buque también se proponen unas condiciones de factores exteriores (como temperatura ambiente y temperatura del agua de la mar) adversas para asegurar que el dimensionamiento en cualquier caso será seguro. A continuación, se expone como es el sistema de distribución del vapor y se define técnicamente los factores que afectan a este.

Durante todo el estudio, dentro de lo posible, se intenta mantener una relación estrecha entre el cálculo teórico y la realidad. De esta forma, el trabajo realizado pueda ser aplicable y útil en distintos casos tanto a nivel conceptual como a nivel teórico siendo, también, de utilidad los conocimientos expuestos para temas relacionados con la generación y distribución del vapor.

Abstract

There are 3 main principles for heat transmission in the steam generators: conduction, convection and radiation. The transformation of fluid (water) into gas (steam) in a steam generator can be understood, technically defined and studied by knowing these principles. A steam generator or boiler is an apparatus that transforms chemical energy (produced by the combustion of some kind of fuel) into thermal energy that is used to heat a thermal fluid. A thermal fluid can be defined as that fluid that is used to exchange heat; in the case of steam generators the thermal fluid used is water. It is important to know how the boiler works technically as well as what physic principles happen during the process of operation in order to develop a good study with global vision of a system of steam generation and distribution.

The present work is a detailed study of the necessary steam that any vessel needs, in this case an oil tanker. This study is based on the steam needed in maximum consume conditions. The other important aspect of the study is the calculations of heat loss of the oil tanker. These calculations were realized using the basic formulas of heat transmission and taking into account the oil tanker geometry.

To ensure a safe sizing of what type or types of steam generators the oil tanker needs, conditions for adverse external factors (environmental temperatures and sea water temperature, among others) are suggested. After that, the structure of the steam distribution system is detailed, and the parameters of the steam distribution are technically defined.

Throughout the study and as long as it is possible, a tight relation between the theoretical calculations and reality is established. Therefore, the study is applicable in several cases both conceptually and technically, being useful for steam generation and distribution areas.

Índice

AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
ÍNDICE	V

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	8
---	----------

1. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DEL CALOR	8
1.1 CONDUCCIÓN	9
1.2 CONVECCIÓN	10
1.3 RADIACIÓN	10
2. EL VAPOR Y TIPOS DE EVAPORACIÓN	11
3. GENERADORES DE VAPOR	13
3.1 TUBOS VAPORIZADORES	13
3.2 RECALENTADORES	13
3.3 ECONOMIZADOR	14
3.4 COLECTOR	14
3.5 CABEZAL	14
3.6 CALENTADOR DE AIRE	14
4 ACCESORIOS DE GENERADORES DE VAPOR	15
4.1 VÁLVULAS DE SEGURIDAD	15
4.2 INDICADORES DE NIVEL	16
4.3 SOPLADORES DE HOLLÍN	20
5. COMBUSTIBLES	22
5.1 COMBUSTIBLES SÓLIDOS	22
5.2 COMBUSTIBLES LÍQUIDOS	23
5.3 COMBUSTIBLES GASES	23
5.4 OTROS TIPOS DE COMBUSTIBLES	24
5.5 PODER CALORÍFICO	24
6. QUEMADORES	25
6.1 QUEMADORES DE CARBÓN	25
6.2 QUEMADORES CICLÓNICOS	26
6.3 QUEMADORES DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO	26
6.4 QUEMADOR DE PULVERIZACIÓN MECÁNICA	26
6.5 QUEMADOR DE DESGASIFICACIÓN	27

6.6 QUEMADORES MIXTOS	27
7. EMISIONES CONTAMINANTES EN GENERADORES DE VAPOR	28
8. TRATAMIENTO DE AGUAS EN GENERADORES DE VAPOR	29
8.1 DESCALCIFICACIÓN	29
8.2 DESCARBONATACIÓN	29
8.3 DESMINERALIZACIÓN	29
8.4 DESGASIFICACIÓN TÉRMICA	29
 CAPÍTULO 2. ESTUDIO DEL SISTEMA DE VAPOR	 31
 1. DESCRIPCIÓN DEL BUQUE	 31
2. DIMENSIONAMIENTO DE LOS TANQUES	34
3. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS TÉRMICAS EN LOS TANQUES	41
4. BALANCE DEL CONSUMO DE LAS TURBOBOMBAS	57
5. BALANCE TOTAL DEL VAPOR CONSUMIDO	59
6. CÁLCULO DE LA SUPERFICIE DEL SERPENTÍN	60
6.1 DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA DE SERPENTINES EN BUQUES PETROLEROS	61
6.2 PURGA DE CONDENSADO	62
7. ELECCIÓN DEL GENERADOR DE VAPOR	63
8. CONCLUSIONES	65
 BIBLIOGRAFÍA	 66
 ANEXO 1. CARACTERÍSTICAS GENERADOR	 68

Capítulo 1. Fundamentos teóricos

1. Mecanismos de transferencia del calor

El calor se define como la energía cinética total de todos los átomos o moléculas de una sustancia y la temperatura es una medida de la energía cinética promedio de los átomos y moléculas individuales de una sustancia.

Cuando se agrega calor a una sustancia, sus átomos o moléculas se mueven más rápido y su temperatura se eleva, o viceversa. Cuando dos cuerpos que tienen distintas temperaturas se ponen en contacto entre sí, se produce una transferencia de calor desde el cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura. La transferencia de calor se puede realizar por tres mecanismos físicos: conducción, convección y radiación, ilustrados en la figura 1. (3)



Figura 1. Transferencia de calor Fuente: (3)

1.1 Conducción

La conducción es el mecanismo de transferencia de calor en escala atómica a través de la materia por actividad molecular, por el choque de unas moléculas con otras, donde las partículas más energéticas le entregan energía a las menos energéticas, produciéndose un flujo de calor desde las temperaturas más altas a las más bajas. Los mejores conductores de calor son los metales. El aire es un mal conductor del calor. Los objetos que son malos conductores, como el aire o plásticos, se llaman aislantes.

La conducción de calor sólo ocurre si hay diferencias de temperatura entre dos partes del medio conductor. Para un volumen de espesor Δx , con área de sección transversal A y cuyas caras opuestas se encuentran a diferentes T_1 y T_2 , con $T_2 > T_1$, se encuentra que el calor ΔQ transferido en un tiempo Δt fluye del extremo caliente al frío. Si se llama H (en Watts) al calor transferido por unidad de tiempo, la rapidez de transferencia de calor $H = \Delta Q / \Delta t$, está dada por la ley de la conducción de calor de Fourier.

Donde k (en W/mK) se llama conductividad térmica del material, magnitud que representa la capacidad con la cual la sustancia conduce calor y produce la consiguiente variación de temperatura; y dT/dx es el gradiente de temperatura. El signo menos indica que la conducción de calor es en la dirección decreciente de la temperatura. (3)

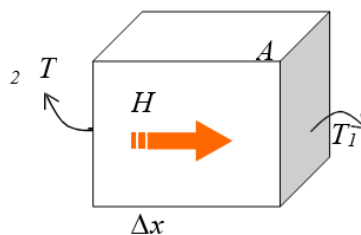


Figura 2. Transferencia de calor en conducción Fuente (3)

1.2 Convección

La convección es el mecanismo de transferencia de calor por movimiento de masa o circulación dentro de la sustancia. Puede ser natural, producida sólo por las diferencias de densidades del material o forzada, que acontece cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro, como por ejemplo, el aire con un ventilador o el agua con una bomba. Sólo se produce en líquidos y gases donde los átomos y moléculas son libres de moverse en el medio.

Un modelo de transferencia de calor H por convección, llamado ley de enfriamiento de Newton, es el siguiente:

$$H = h A (T_A - T)$$

Donde h se llama coeficiente de convección, en $W/(m^2K)$, A es la superficie que entrega calor con una temperatura T_A al fluido adyacente, que se encuentra a una temperatura T , como se muestra en el esquema de la figura 3.

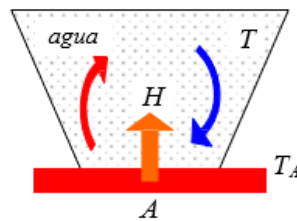


Figura 3. Transferencia de calor en convección Fuente (3)

El flujo de calor por convección es positivo ($H > 0$) si el calor se transfiere desde la superficie de área A al fluido ($T_A > T$) y negativo si el calor se transfiere desde el fluido hacia la superficie ($T_A < T$). (3)

1.3 Radiación

La radiación térmica es energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura determinada, se produce directamente desde la fuente hacia afuera, en todas las direcciones. Esta energía es producida por los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas

constitutivas y transportadas por ondas electromagnéticas o fotones, por lo recibe el nombre de radiación electromagnética. La masa en reposo de un fotón (que significa luz) es idénticamente nula. Por lo tanto, atendiendo a la relatividad especial, un fotón viaja a la velocidad de la luz y no se puede mantener en reposo. La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes y perpendiculares entre sí, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro.

A diferencia de la conducción y la convección, o de otros tipos de onda, como el sonido, que necesitan un medio material para propagarse, la radiación electromagnética es independiente de la materia para su propagación, de hecho, la transferencia de energía por radiación es más efectiva en el vacío. Sin embargo, la velocidad, intensidad y dirección de su flujo de energía se ven influidos por la presencia de materia. La longitud de onda (λ) y la frecuencia (ν) de las ondas electromagnéticas, relacionadas mediante la expresión $\lambda \nu = c$, son importantes para determinar su energía, su visibilidad, su poder de penetración y otras características. Independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío con una rapidez constante $c = 299792 \text{ km/s}$, llamada velocidad de la luz. (3)

2. El vapor y tipos de evaporación

Etimología: deriva del latín vapor, vaporis...

Fluido gaseoso cuya temperatura es inferior a su temperatura crítica. Su presión no aumenta al ser comprimido, sino que se transforma parcialmente en líquido; p. ej., el producido por la ebullición del agua. (4)

Existen dos tipos de vapor. Dependiendo de las condiciones de trabajo a las que queremos hacer trabajar el vapor, usaremos un tipo de vapor u otro.

Vapor sobrecalentado o recalentado: es aquel que es calentado a una temperatura por encima de su temperatura de evaporación. Se utiliza para el uso mecánico del vapor en una turbina, se somete

a una expansión disminuyendo su presión y temperatura. En caso de utilizar vapor saturado, inmediatamente aparecería vapor húmedo con gotas que pueden dañar los álabes.

Vapor saturado: es aquel vapor que, dada una temperatura, por una presión determinada, la fase líquida y el vapor se encuentran en un equilibrio dinámico. Si usamos el vapor para el intercambio térmico, será completamente diferente. Así, la entalpía “h” del vapor saturado, es muy superior a la del líquido saturado. Por tanto, al tener una entalpía elevada junto con un coeficiente de convección alto, en su condensación cederá una gran cantidad de calor. Interesará por tanto que sea vapor saturado el que usemos en el intercambiador de calor ya que se cederá calor mucho más rápido que con vapor recalentado. Del orden de unas 10 veces más rápido dado su coeficiente de convección.

Cuando se estudia el vapor como un fluido térmico de trabajo se ha de tener en cuenta los coeficientes de convección ya que estos influirán sobre el tipo de evaporación que tendremos. Nos interesa que el coeficiente de convección sea alto, ya que de esta forma el tubo vaporizador siempre estará bien refrigerado y la transmisión de calor será muy buena del tubo hacia al agua. De esta forma, se puede mantener la temperatura del tubo entre unos valores aceptables para el límite térmico del material. Dependiendo de cómo se produzca esta evaporación dentro del tubo podemos tener dos tipos de evaporación, a saber:

Evaporación nucleada: se produce cuando al evaporarse el agua se forman pequeñas burbujas de vapor. Al estar el agua en contacto con los tubos, se forman burbujas de vapor. Si aplicamos calor, estas burbujitas se forman. A causa de la tensión superficial, se quedan pegadas al tubo, pero como que las burbujas de vapor son menos densas que el agua, se genera una fuerza que las empuja hacia arriba. Cuando las burbujas llegan a una cierta medida, este empuje es más grande que la tensión superficial y las burbujas se dirigen hacia arriba.

Evaporación pelicular: se genera cuando la transmisión de calor en el tubo es muy elevada; el agua que está alrededor del tubo se evapora rápidamente formándose una capa de burbujas de vapor. A

causa de esta capa de vapor, el coeficiente de convección disminuye y por ese motivo, aumenta la temperatura del tubo. Esta evaporación no nos interesa.

3. Generadores de vapor

Un generador de vapor o caldera es un aparato que transforma la energía química (producida por la combustión de algún tipo de combustible) en energía térmica que sirve para calentar un fluido térmico. Se puede definir fluido térmico como aquel fluido que se utiliza para intercambiar calor, en el caso de los generadores de vapor el fluido térmico utilizado es agua. A continuación, se detallan y explican las partes principales de los generadores de vapor.

3.1 Tubos vaporizadores

Se encargan de vaporizar parcialmente el agua; es decir, los tubos vaporizadores tienen como función pasar de líquido a vapor a una temperatura constante, la que corresponda a la presión y tipo de evaporación que nos interesa.

3.2 Recalentadores

Son unos tubos intercambiadores de calor que su función es sobrecalentar el vapor. El vapor entra y circula hasta que se encuentra con un tope, una tapa. El único camino que puede tomar es introducirse por los tubos. Va pasando de banda a banda hasta llegar a la salida. El número de fases depende de la superficie que necesitamos, en este caso hay 3 fases. Tienen purgas para que cuando la caldera funcione en frío, y el agua se condense, pueda tener una vía de escape.

Los tubos se sobrecalientan hasta una temperatura casi máxima teniendo en cuenta el límite de los materiales empleados. Para controlar la temperatura de salida del vapor se pondrán sistemas de control.

Existen dos tipos de sistemas:

- 1.- Recalentador integral: está situado dentro de la caldera, es el sistema clásico.
- 2.- Recalentador exterior: está situado fuera de la caldera, es un sistema más moderno.

3.3 Economizador

Son unos tubos intercambiadores de calor, su función es calentar el agua desde la temperatura de entrada hasta una temperatura cercana a la de evaporación. Esto se consigue con la ayuda del calor sobrante de los otros procesos. El intercambiador de calor, calienta el agua de alimentación, desde que entra en la caldera hasta que la envía a los tubos vaporizadores. Para calentar se aprovecha el calor de los gases, antes de expulsarlos por la chimenea.

3.4 Colector

Es un cilindro de diámetro grande donde van a parar los tubos vaporizadores, en caso de que sea el colector superior. En él, se separa el vapor del agua líquida. El agua líquida, es devuelta otra vez a un colector inferior, a través de unos tubos de caída. Estos tubos de caída están aislados del calor y normalmente van por el exterior de la caldera.

3.5 Cabezal

El cabezal es como un colector al cual van unidos los tubos vaporizadores. Son de fácil construcción y sirven para asegurar que dentro de los tubos siempre habrá agua. Además, estos cabezales deberán tener una abertura para poder acceder por si hay que llevar a cabo una reparación (mandrinar, soldar, poner un tapón...).

3.6 Calentador de aire

Antes de añadir el aire para la combustión lo hacemos pasar por un intercambiador de superficie, en concreto un intercambiador regenerativo. Es una especie de tambor con una estructura metálica en forma de jaula cilíndrica de un tamaño bastante grande. Este tambor se rellena de material cerámico para que contenga una cierta inercia térmica. Irá girando despacio mediante un motor. El material de relleno se calentará gracias al calor de los gases, y el aire absorberá parte del calor del material de relleno, enfriándolo a la vez.

4 Accesorios de generadores de vapor

4.1 Válvulas de seguridad

Cuando los automatismos fallan podemos tener un aumento constante de la presión en la caldera que podría provocar el estallido de la caldera. La función de las válvulas de seguridad es evitar que la caldera estalle o sufra daños estructurales graves.

Presión de timbre: es aquella presión que va grabada en la plancha de la caldera y para la cual la caldera está diseñada.

Presión de prueba: es la presión a la que se hace la prueba de una caldera. Se realiza cuando la caldera es nueva y cada vez que se haga una revisión o reparación en la caldera.

Presión de régimen: ésta, es ligeramente inferior a la de timbre. Es la presión con la que trabaja, normalmente, la caldera.

Requisitos para el funcionamiento:

- Éstas, tienen que ser capaces de evacuar el máximo caudal de vapor que es capaz de producir la caldera en las condiciones de máxima producción de vapor y consumo nulo.
- A la que se supera un 3% la presión de timbre, las válvulas se han de abrir automáticamente. Una vez se ha evacuado el vapor y ha bajado la presión las válvulas de seguridad, se han de cerrar automáticamente.
- Se han que poder accionar manualmente.

4.2 Indicadores de nivel

Sistema clásico

Se basa en un mecanismo de vasos comunicantes en que por medio de un tubo de cristal se debe distinguir el nivel de agua con el vapor, el tubo lleva unos soportes con unas bridas para conectar, a su vez, con otras bridas a la caldera, tanto en la parte superior como en la inferior. Este sistema funciona bien a presiones bajas ya que el cristal si se somete a altas presiones, se rompería. Por lo tanto, se tendría que poner un cristal más grueso, aunque tampoco nos garantizaría nada ya que se vería mal y distorsionado. El problema de los indicadores sobre todo es en la parte visual, puesto que tanto el agua como el vapor son incoloros y es complicado diferenciarlos. Además, hay que ir haciendo extracciones periódicamente para que no se vea barro en el cristal, producido por las reacciones químicas del tratamiento del agua. La línea de separación entre el agua y el vapor se denomina menisco.

Nivel Klinger

Este nivel utiliza los principios de la reflexión y refracción. Está constituido por una barra de cristal de sección rectangular con una serie de ranuras a lo largo de toda su longitud. Estas ranuras se ponen en contacto tanto con el agua como con el vapor. En caso de iluminarse esta zona en función de que haya vapor o agua pasaran dos cosas distintas: en la parte que haya vapor, el valor de ángulo límite entre el cristal y el vapor es tal que el ángulo que se forma con el interfaz siempre se reflejará; en la parte que haya agua, el valor del ángulo límite entre el cristal y el vapor es tal que el ángulo que se forma con el interfaz siempre se refractará. De esta manera, la parte del agua será una zona luminosa, mientras que la parte del vapor será una zona opaca. El nivel estará en el punto donde se

encuentre el cambio de opaco a luminoso. Entre la cámara y el cristal se tendrán que poner juntas para que no existan fugas.

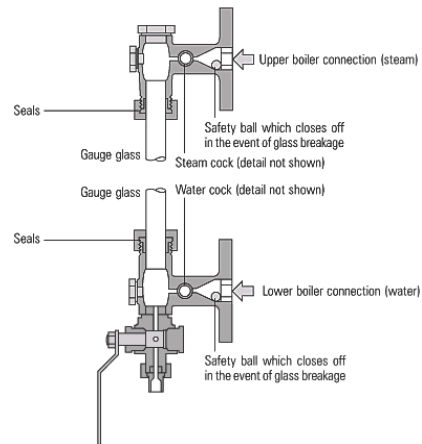
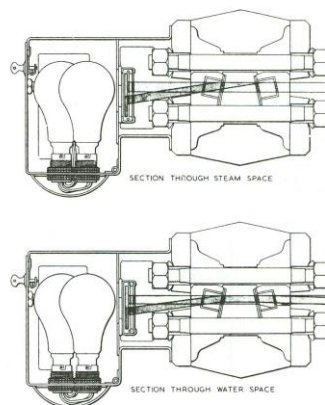


Figura4. Nivel Klinger Fuente: (7)

Nivel con sensores de colores

Este, tiene unas aberturas con unos cristales de diferentes colores por los que salen rayos con ángulos y colores diferentes (por ejemplo, rojo y verde). En el caso del vapor, unos de los rayos se reflejan y el otro se refracta. En el caso del agua pasa lo mismo, pero de manera contraria. De esta forma, se consigue que haya una zona con una iluminación verde y la otra con una iluminación roja. La zona donde se produce el cambio de color es donde está el nivel.



Showing light effects in bi-colour water gauges

Figura 5. Nivel con sensores de colores Fuente (7)

Sensor termohidráulico

El vapor saturado al transmitir calor al exterior se condensa formando gotas (coeficiente de convección calor alto). Si el nivel de agua de la caldera es bajo, más vapor habrá en el tubo, por lo que se cederá mucho más calor al exterior. En la parte de agua, el coeficiente de transmisión es bajo, por lo que se cederá menos calor. Si el nivel baja, habrá menos zona de agua y más vapor, con lo que el agua se calentará, evaporándose y aumentando la presión. De esta forma, a más nivel de agua menos presión, y a menos nivel de agua más presión. A partir de las mediciones del sensor, este mandará una señal acorde a la situación (apagando quemadores, dando alarma, abriendo o cerrando válvulas de paso de agua..., según la situación).

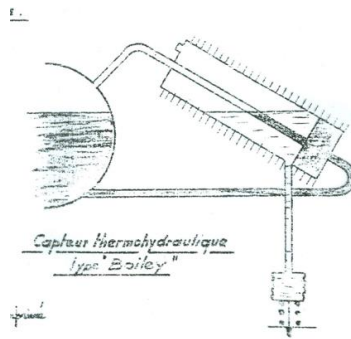


Figura6. Sensor termohidráulico Fuente: (7)

Sensor termostático

El principio de funcionamiento es el mismo que el anterior, lo único que varía es que tenemos un tubo unido por vasos comunicantes y una pieza metálica fija por una punta. Al calentarse o enfriarse, se dilatará o contraerá el tubo, respectivamente. En función de la variación de la longitud en la parte inferior y a través de un amplificador de señal, se podrá saber el nivel de la caldera. Ya que el nivel de agua será proporcional a la dilatación o contracción del tubo.

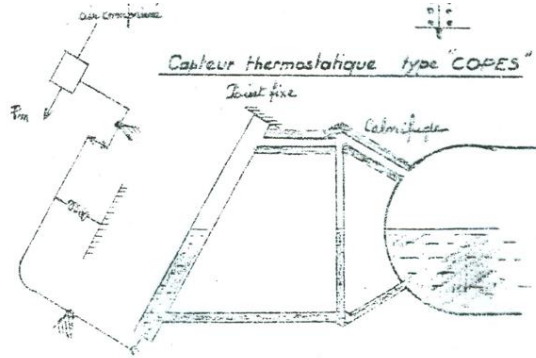


Figura7. Sensor termostático Fuente: (7)

Sistema de regulación todo o nada

Este sistema funciona también mediante vasos comunicantes. Hay un flotador con un vástago y un imán en la punta que activa los distintos sensores. En función del nivel se activará un sensor u otro.

Hay cuatro interruptores:

Uno de bajo nivel (pone en marcha la bomba de alimentación).

Otro de alto nivel (para la bomba de alimentación).

Un tercero de seguridad para muy bajo nivel, si la bomba no se pone en marcha, el nivel de agua continuará bajando y hace sonar una alarma y apaga los quemadores.

Un cuarto de seguridad de alto nivel, si la bomba no se para, el nivel continuará subiendo. Este nivel para la bomba y hace sonar una alarma.

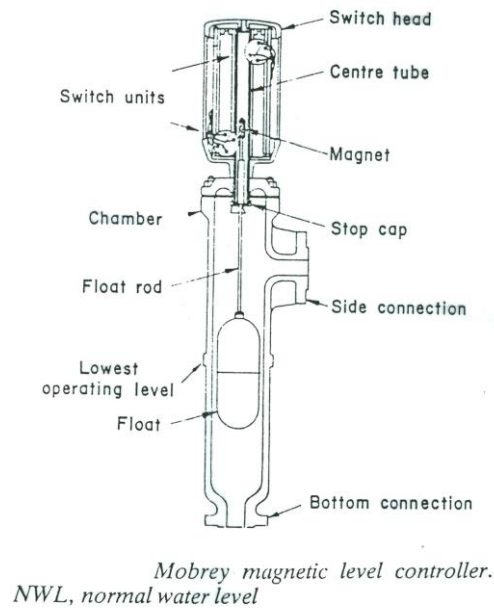


Figura8. Sistema regulación todo o nada Fuente: (7)

4.3 Sopladores de hollín

Los sopladores de hollín son accesorios cuya función es la de limpiar las superficies de transmisión de calor de las deposiciones de inquemados que generalmente producen los combustibles. Si estas superficies no se limpian, se creará una capa gruesa de inquemados que afecta la transmisión de calor y además esta capa es inflamable. Para evitar problemas causados por el hollín, lo que se hace es una limpieza tantas veces como sea necesario. Esta limpieza se realiza mediante sopladores de hollín, que soplando o mandando un fuerte chorro de vapor, despegan la capa de inquemados.

Para soplar el hollín de los recalentadores puede haber problemas, ya que el soplador está sometido a altas temperaturas. En las zonas de la caldera donde la temperatura es muy elevada y se podría quemar (mientras funciona es refrigerado por el vapor), lo que se puede hacer es sólo introducir el soplador cuando se tiene que utilizar. Cuando no se tiene que utilizar, se saca fuera de la caldera.

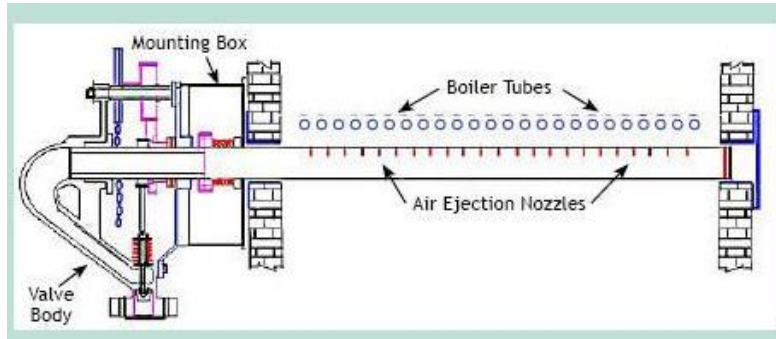


Figura9. Soplador de hollín Fuente: <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/auditando-sopladores-de-hollin-en-una-planta-de-energia-de-combustion-de-ca>

En las zonas más frías se puede mantener el soplador dentro de la caldera. De este modo, se puede diferenciar entre sopladores fijos y retráctiles. El sistema consiste en mandar vapor a través de los sopladores y extraer el hollín. La limpieza se tendrá que hacer manteniendo un orden concreto para evitar que al limpiar una zona se ensucie otra. Normalmente se empezará a limpiar desde la zona más alejada de la chimenea hasta la zona más cercana. Por este motivo será normal que empiecen a funcionar antes los sopladores retráctiles que los fijos. También se tendrá que dar la máxima cantidad de aire posible mediante los ventiladores para echar el hollín fuera.

Sopladores fijos rotativos

Este soplador está suele estar situado entre los tubos economizadores o recalentadores de aire.

Está agujereado alrededor de toda su superficie para conseguir una mejor limpieza de los tubos. Mediante un motor, se hace girar el soplador para que llegue a todas las superficies de la caldera. El soplador tiene un engranaje para que la rotación sea lenta. Normalmente este sistema está accionado por motores neumáticos, aunque en calderas pequeñas se puede encontrar que el accionamiento sea manual.

Sopladores retráctiles rotativos

En este caso, el soplador entra cuando tiene que funcionar y cuando deja de funcionar, se desplaza hacia fuera. Este dispone de un movimiento rotativo y uno de traslación, sólo tiene toberas en el

extremo ya que, al moverse en traslación, ya llega a la limpieza de todos los tubos. El vapor entra por una tubería principal y sigue por una tubería telescópica que se alarga y se acorta. El cuerpo del sistema está dispuesto fuera de la zona de calor de la caldera y es sostenido por una viga de soporte. Tiene un motor que realiza tanto el movimiento de rotación como de traslación. El sistema tiene una guía de soporte por donde se va moviendo el tubo.

Sopladores ultrasonidos

En este caso se intenta eliminar el hollín haciendo vibrar los tubos mediante un altavoz. Las ondas emitidas por el altavoz se intentan que estén fuera del rango auditivo. Normalmente, son frecuencias muy bajas.

5. Combustibles

Los combustibles que se suelen utilizar son los combustibles fósiles estos proceden de los elementos vegetales, animales (orgánicos) que en el pasado quedaron fuera del contacto con el aire y quedaron sometidos a presiones y temperaturas elevadas. De esto combustibles los hay en los 3 estados.

5.1 Combustibles sólidos

Carbones: estos se pueden clasificar según su antigüedad. Cuanto más tiempo dure el proceso de carbonización más bueno será el carbón.

Antracita: es el carbón muy puro que puede contener hasta un 99% de carbono puro. Al ser tan puro deja muy pocos residuos, compuestos de azufre, cenizas... Este es muy utilizado en la industria metalúrgica, o cuando se quiere un combustible muy bueno.

Hulla: es el carbón más utilizado como combustible en máquinas térmicas, este puede tener entre un 45%-85% de carbono puro.

Lignito: tiene un contenido de carbono puro de un 65% a un 75%. Esto quiere decir que puede haber un contenido en materia orgánica, azufre, grados de humedad altos, por lo que no será muy bueno.

Turba: de los anteriores es el que tiene menos contenido de carbono puro. Este tipo de carbón es el menos utilizado como combustible ya que por su contenido de carbono puro es el de menos calidad.

5.2 Combustibles líquidos

El petróleo crudo es una mezcla de los diferentes hidrocarburos. Para separar los diferentes hidrocarburos se realiza la destilación. A la entrada de la torre de destilación entra el crudo a 350-420°C y en función de la temperatura de evaporación/condensación a presión atmosférica se irán obteniendo los diferentes hidrocarburos. Dependiendo de la temperatura de evaporación se evaporará el producto, y al condensarse se obtendrán los diferentes derivados. Los que tienen la temperatura de evaporación menos elevada y no se condensan pasan por la parte superior y se obtienen los gases provenientes del petróleo. Al final quedará un residuo que a presión atmosférica no se puede separar y si se quisiera separar aún más, se tendría que realizar el vacío.

Los productos que saldrán serán productos de cadenas largas, para obtener productos de cadenas más cortas se puede realizar el cracking.

El cracking consiste en romper o descomponer hidrocarburos de elevado peso molecular, en compuestos de menor peso molecular. Este se puede realizar mediante “cracking de temperatura” o “cracking con catalizadores”. Al final de este proceso nos quedan los combustibles residuales. Dentro de este grupo encontramos el fuel-oil que se clasifica según el número IFO. A mayor número IFO más residual será el combustible.

5.3 Combustibles gases

Los combustibles gaseosos se dividen en diferentes grupos, hay 3 familias fundamentales:

- Gases licuados del petróleo: los más importantes son el butano y el propano.
- Gas natural: compuesto principalmente por metano y otra serie de gases.
- Gases manufacturados: son gases que se utilizan con diversas aplicaciones. Principalmente son empleados en procesos de fabricación. Pueden ser a la vez orgánicos e inorgánicos y se obtienen del aire mediante un proceso de separación o producidos por síntesis química.

Estas tres familias se diferencian por su poder calorífico; por orden de más a menos: gases licuados del petróleo, gas natural y gas manufacturado.

5.4 Otros tipos de combustibles

Para combustibles de calderas también se suelen utilizar combustibles del tipo:

- Madera
- Cáscaras de frutos secos
- Lejías negras
- Biomasa
- Basuras orgánicas

5.5 Poder Calorífico

El poder calorífico es la cantidad de calor producida por la combustión completa de una unidad de masa o volumen. Para calcular el poder calorífico se usa un calorímetro. Existen dos tipos de poder calorífico; en función del calorímetro, el poder calorífico podrá dar un valor superior o inferior. Dependiendo de las normas utilizadas, se obtendrá el poder calorífico superior (PCS) o el inferior (PCI).

6. Quemadores

Los quemadores son elementos diseñados para que se produzca la combustión del combustible. En función del combustible, el quemador será diferente.

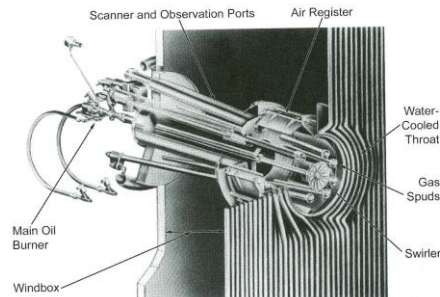


Fig. 6 Circular register burner with water-cooled throat for oil and gas firing.
Figura 10. Quemadores caldera Fuente: (7)

6.1 Quemadores de carbón

En el caso de los combustibles sólidos, dependiendo del tamaño del carbón se tendrán unas necesidades u otras. El carbón, se podrá quemar en trozos pequeños, medianos o grandes. Cuando más grande los trozos, como habrá menos superficie de carbón en contacto con el aire, más tardará la combustión. Para conseguir la combustión completa del carbón, se suele quemar desde la salida del quemador hasta la salida de la cámara de combustión para asegurar la combustión completa. En calderas que se quema carbón es muy importante también el diseño del hogar de la caldera.

Quemador de trozos grandes

Para la quema de trozos grandes el peso de estos será mayor, por lo que la mayoría de los trozos no podrán ser impulsados por el ventilador y como consecuencia, se tendrá que utilizar un soporte. Además, el tiempo de combustión que necesitará será tal, que los trozos de carbón, al llegar al final de la cámara de combustión aún no se habrían quemado. El soporte utilizado, normalmente, es una parrilla de acero de manera que los huecos que quedan entre las varillas de acero sean más pequeños que las partículas de carbón. Para que las varillas de acero no se quemen y se pueda producir la combustión de forma correcta, el aire será introducido a través de la parrilla. Para que la combustión se vaya produciendo de forma adecuada y las cenizas vayan cayendo al cenicero, existe un sistema de parrilla móvil.

6.2 Quemadores ciclónicos

La idea está en introducir el carbón con el aire primario tangencialmente dentro de una cámara cilíndrica, de manera que el carbón y el aire primario giren pegados a la pared de esta. En la parte final se encuentra un obstáculo a la hora de salir que hace cambiar la dirección de la mezcla y esta vuelve por la parte interior. Al final, vuelve a haber un cambio de dirección y sale por la salida. A medida que va avanzando por el quemador, se va insertando aire progresivamente. De esta manera se consigue que se pueda hacer la combustión de manera completa. En este quemador se forma capas de escoria fundida. Esta ceniza sale por un orificio para que no obstruya el quemador.

6.3 Quemadores de combustible líquido

Al hacerse la atomización del combustible para la combustión, la gota líquida atomizada cuando sale del atomizador empieza a combustionar, prácticamente, al instante. De esta manera, se consigue que la superficie de contacto de las gotas con el aire sea mayor. Cuanto menor sean las gotas, mayor superficie por lo que la combustión será mayor y se necesitará menos meter un exceso de aire menor. Lo que se pretende conseguir es que sean gotas muy pequeñas y que se repartan de forma uniforme. Dependiendo del uso, la combustión se podrá realizar de diversas maneras:

Forma lenta (gotas grandes): se producen vapores por medio del aumento de la temperatura. Al mezclarse con el aire se realiza la combustión. Se ha de hacer por encima de la temperatura de inflamación.

Forma rápida (gotas pequeñas): al ser las gotas más pequeñas, la superficie con el aire es mayor, las gotas se evaporan más fácilmente y se produce la combustión. En función de la gota que se quiera conseguir, hay diferentes métodos de pulverización.

6.4 Quemador de pulverización mecánica

Este método consiste en inyectar el combustible a alta presión por un orificio de diámetro pequeño mediante una bomba. Al ser la presión elevada, el combustible al salir por el orificio pequeño, sale

en forma de gotas finas. Si la presión no es elevada y el orificio es pequeño, no se podrá conseguir que se produzca la pulverización.

Pulverización mecánica con chorro helicoidal: se puede colocar una pieza antes de la salida del orificio que someta el combustible a un cambio de dirección. Al estar sometido a este cambio de dirección y gracias al impulso de la bomba, se creará una pulverización formando un helicoides.

Pulverización mecánica con chorro helicoidal y regulación de caudal (pulverización mecánica en retorno): la posibilidad es que en vez de poner un tubo que alimente el pulverizado, es poner dos tubos concéntricos. En este caso el combustible vendrá por el espacio entre los dos tubos concéntricos y se dejará un espacio en el tubo interior para que el combustible pueda retornar. Al llegar el combustible al final del tubo y querer pasar por las ranuras, se producirán unas pérdidas de carga. El orificio de retorno vendrá regulado por una válvula. En función de la abertura de la válvula, al producirse las pérdidas de carga en las ranuras, retornará más o menos combustible por el cilindro interior. Cuando más se abra la válvula más combustible retornará y menos combustible se quemará.

6.5 Quemador de desgasificación

Este consiste en un recipiente que contiene el gasoil y por la parte superior está agujereado para permitir que entre el aire a través de estos orificios. Una llama calienta el combustible y hace que el combustible se evapore. Estos vapores se mezclan con el aire que va entrando por los agujeritos y al mezclarse la propia llama, hace que se quemen. Hay un sistema regulador para reglar la cantidad de combustible que se quema. Este sistema sería un equivalente al sistema de quemado de carbón en parrilla.

6.6 Quemadores mixtos

Por la zona interior, funciona como un quemador de fuel normal. El fuel es atomizado y se forma un chorro pulverizado. El quemador dispone de un deflector para crear la corriente de aire ideal para que el chorro de combustible, al mezclarse con el comburente, se queme de forma adecuada. En la parte exterior del quemador, está el quemador de gas.

7. Emisiones contaminantes en generadores de vapor

Es evidente que durante el proceso de combustión que se produce en la caldera para generar vapor, se generan unos gases de escape. Estos gases de escape en su mayor parte están formados por los expuestos a continuación. Debido a la combustión siempre se producen partículas o residuos que se deben tener en cuenta y, por ende, formular.

- N_2 : este no es un gas tóxico a menos que reaccione con oxígeno.
- CO_2 : este no es un gas tóxico, el problema es que contribuye moderadamente al efecto invernadero. El efecto invernadero consiste en que se deja pasar la radiación que emite el sol con su longitud de onda correspondiente; la tierra también emite radiación a la longitud de onda que corresponde a su temperatura, una longitud de onda muy diferente a la del sol que el CO_2 no deja pasar.
- H_2O
- SO_x (SO , SO_3): los óxidos de azufre cuando reaccionan con el agua presente en la atmósfera que se encuentra en forma de humedad, dan lugar a ácido sulfúrico que es el causante de la lluvia ácida.
- NO_x (NO , NO_2): en este caso a temperaturas elevadas, el nitrógeno reacciona con el oxígeno produciendo óxidos de nitrógeno. Estas cantidades se cuentan en partes por millón = miligramos/litro.
- Partículas sólidas: cenizas, inquitados, carbonilla, hollín...
- Hidrocarburos volátiles (HV)

8. Tratamiento de aguas en generadores de vapor

La caldera ha de recibir un buen tratamiento de aguas para su mantenimiento. Esto supone realizar una serie de ensayos para saber la composición del agua y añadir productos químicos o extraer agua en función de si les falta productos químicos o les sobran.

8.1 Descalcificación

Uno de los tratamientos que se le aplica a esta agua, son los tratamientos de intercambios iónicos que consisten en intercambiar algunos de estos iones de manera que se consigan sales que no den problemas. La Zeolita es un tipo de tierra usada antiguamente que tiene la propiedad que hace intercambios de iones. En la actualidad en vez de utilizar las tierras naturales se utilizan polímeros que se pueden cargar de iones sodio. Se deja pasar el agua a través de los polímeros y se produce el intercambio que se pretendía. Estos polímeros cuando se quedan sin iones de sodio, se tienen que regenerar.

8.2 Descarbonatación

Este método se usa para eliminar los bicarbonatos de calcio y magnesio que contiene el agua. El funcionamiento es el mismo que en el caso anterior.

8.3 Desmineralización

Este tratamiento elimina las sales del agua por completo y se hace en dos fases. Éste, es el que se utiliza para calderas de presiones muy altas.

8.4 Desgasificación térmica

Este tratamiento se realiza con temperatura y consiste en que justo antes de aspirar el agua, la hacemos pasar por un desaireador y eliminar el posible oxígeno que tenga el agua. Este aparato calienta el agua muy cerca de la temperatura de evaporación porque cuanto mayor es la temperatura del agua, tiene menos capacidad de tener gases disueltos. De esta forma, se conseguirá

que se vaya una gran parte de los gases. Estos gases se van aspirando de la superficie del agua para que la concentración sea pequeña.

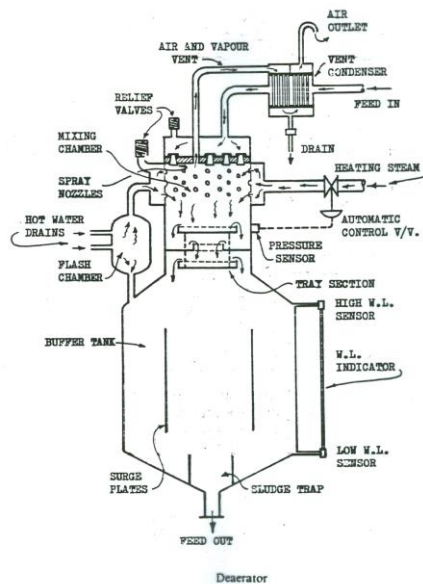


Figura11. Esquema desgasificación térmica Fuente: (7)

Capítulo 2. Estudio del sistema de vapor

1. Descripción del buque

Milos es el primer buque de una serie de dos petroleros tipo Suezmax, contruidos por Sungdong Shipbuiding Marine Engineering para Kyklades Marine Corporation. El buque está construido según las normas de construcción de Lloyds Register con los diseños de la IACS Common structural Rukes (CSR). El buque tiene como características principales un doble casco, un bulbo en la proa, una popa de tipo abierto, un timón semicompensado y una hélice de paso fijo accionada por un motor diésel de baja velocidad. El motor principal es un MCR Wartsilia 6x72 con bypass delta Tier II con una potencia de 15088 kW y 71.8 rpm para un consumo eficiente. La velocidad para la cual se ha diseñado el buque es de 14,2 nudos.

La electricidad está generada por tres generadores diésel conectados al alternador que tiene potencia una potencia de 980 kW. El vapor es generado por dos calderas con una capacidad total de 35000 kg/h. El buque tiene seis pares de tanques de carga, dos tanques de sedimentación tanto en el pique de proa como en el pique de popa, tanques de fueloil y tanques de agua dulce. Los tanques de carga están divididos de manera longitudinal y transversal. La operativa de carga se realiza con 3 bombas centrifugas de caudal de 3000 metros cúbicos por hora accionadas por una turbina de vapor.

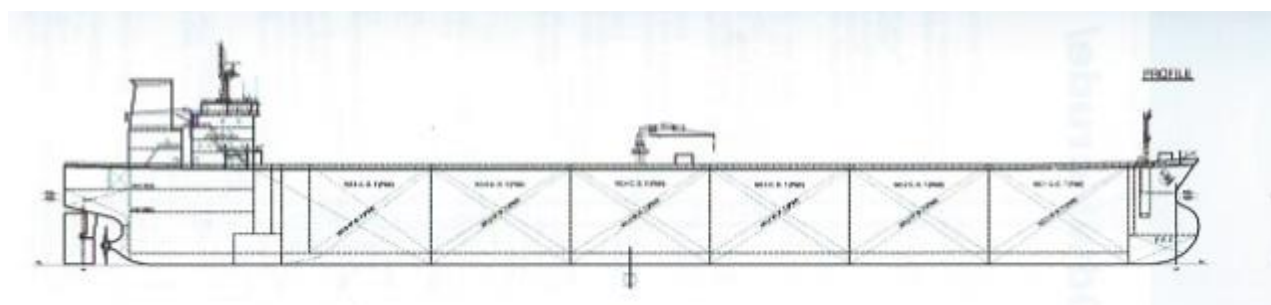
Número IMO	9746619
Nombre del buque	MILOS
Tipo de buque	Petrolero
Número casco	S2046
País de bandera	Grecia
Eslora total	277,27 m
Eslora entre perpendiculares	267 m

Manga de trazado	48 m
Puntal de trazado (hasta cubierta principal)	23,1 m
Escantillando	17,5 m
Peso muerto	157460 t
Capacidad de carga	170000 m ³
Tanque Fuel-Oil	3700 m ³
Tanque Diesel	1000 m ³
Vapor producido por las calderas	35000 kg/h

Tabla 1. Particularidades técnicas del buque. Fuente: propia

El agua de lastre se bombea mediante unas bombas con motor eléctrico y el sistema de tratamiento de aguas es electrolítico y está diseñado para ser respetuoso con el medio ambiente. Tiene una capacidad de 4000 m³/h para el principal y 300 m³/h para los servicios ATP de los tanques de lastre. El buque cumple con todos los requisitos medioambientales de lucha contra la contaminación por hidrocarburos establecidos por la IMO. (5)

A continuación, se muestra el plano alzado y perfil del buque estudiado y también un esquema de los tanques de carga del buque con la numeración dada que servirá para realizar el estudio de las pérdidas térmicas de cada uno de ellos.



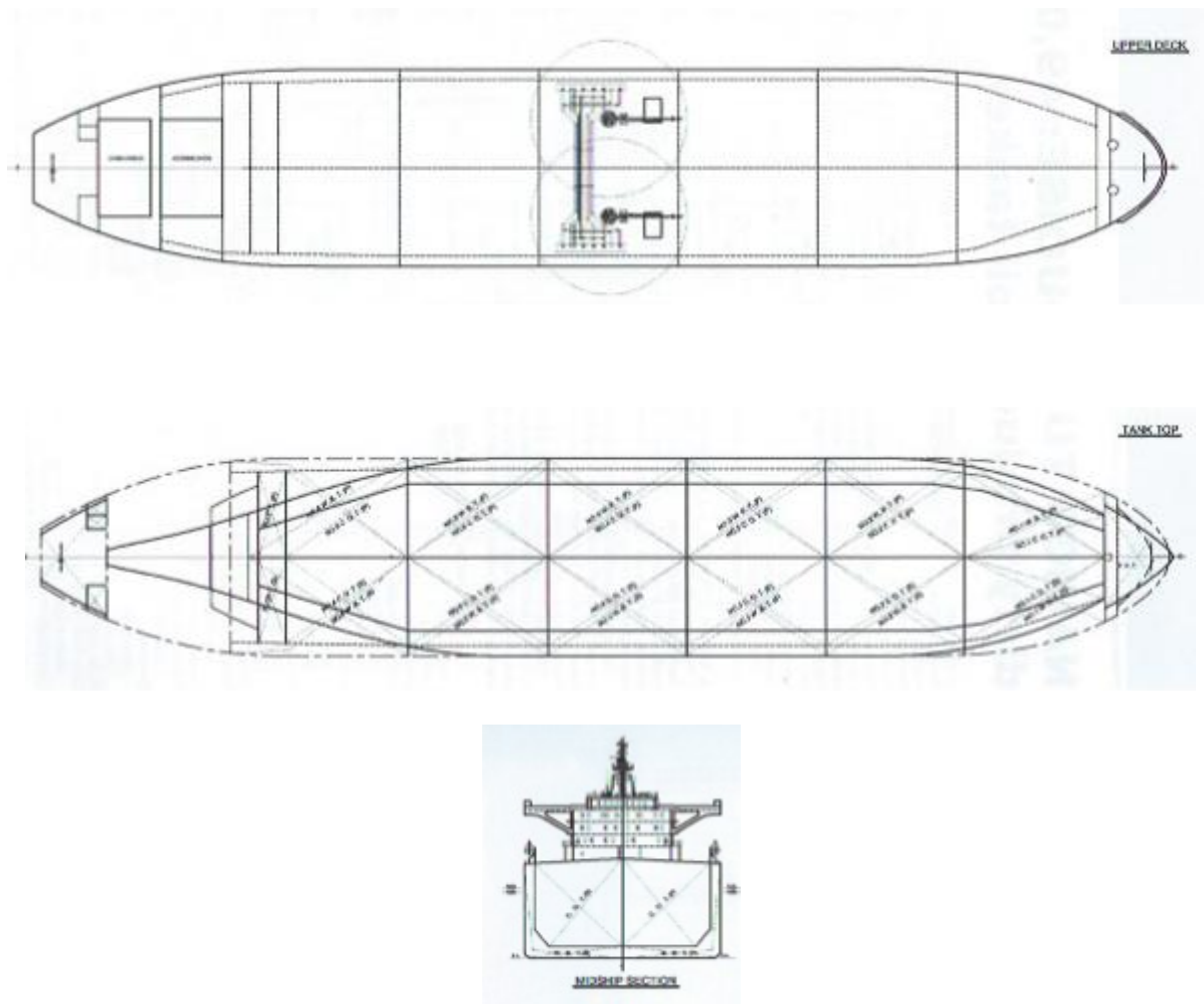


Figura12. Plano del buque Milos Fuente: (1)

Tanque 1 babor (T1B)	Tanque 1 estribor (T1E)
Tanque 2 babor (T2B)	Tanque 2 estribor (T2E)
Tanque 3 babor (T3B)	Tanque 3 estribor (T3E)
Tanque 4 babor (T4B)	Tanque 4 estribor (T4E)
Tanque 5 babor (T5B)	Tanque 5 estribor (T5E)
Tanque 6 babor (T6B)	Tanque 6 estribor (T6E)

Figura13. Esquema tanques de carga Fuente: propia.

2. Dimensionamiento de los tanques

El método matemático para dimensionar los tanques del buque MILOS se basa en dos razonamientos básicos. La capacidad total de carga del buque se ha dividido por el número de tanques sin tener en cuenta ninguna otra variable. De esta forma tenemos un tanque de referencia. Los tanques los estudiamos como si tuvieran una forma de paralelepípedo.

El primer razonamiento a tener en cuenta es la posición que ocupa cada tanque, ya que dependiendo de esta misma tendrá más volumen o menos. En función de esto se ha rebajado un tanto por ciento el volumen al tanque elegido y consecuentemente este volumen se ha añadido al tanque modelo.

El segundo razonamiento es que usamos un tanque modelo como muestra para obtener el volumen de todos los tanques del buque. Este se ha calculado dividiendo el total de capacidad de carga entre el número de tanques, sin tener en cuenta la posición de este.

El criterio de definición para decidir a qué tanque asignamos más volumen y a que tanque asignamos menos volumen, es un criterio sobre plano del buque. Es decir, se ha medido la longitud de cada tanque, de la vista en alzado, y se ha asignado un tanto por ciento mayor o menor dependiendo de esta.

Como se ha comentado anteriormente los tanques consideraremos que los tanques tienen una forma de paralelepípedo regular y por lo tanto se pueden calcular matemáticamente aplicando la fórmula del volumen paralelepípedo, a saber:

$$V = a \times b \times h$$

Es necesario comentar que el dimensionamiento no es exacto, pero es muy aproximado a la realidad. Al no tener los planos exactos del buque Milos, la única manera de poder realizar el cálculo de pérdidas de calor, era esta.

Tanque modelo:

Suponemos que todos los tanques son iguales y proponemos el tanque modelo T'. Este, se obtiene de dividir la capacidad de carga total entre el número de tanques, sin tener en cuenta ninguna otra variable.

$$T' = \frac{\text{Capacidad de carga total}}{\text{número de tanques}}$$

$$T' = \frac{170000}{12} = 14166,6 = \frac{42500}{3} m^3$$

Definimos los tanques T1B, T1E, T6B y T6E un quince por ciento (15%) más pequeños que el tanque modelo por los criterios definidos con anterioridad. Los tanques mencionados, son iguales geométricamente.

$$T1B=T1E=T6B=T6E$$

$$T1 = T' - T' \times \frac{15}{100}$$

$$T1 = \frac{42500}{3} - \frac{42500}{3} \times 0,15 = \frac{36125}{3} = 12041,66 m^3$$

Definimos los tanques T2B y T2E un cinco por ciento (5%) más pequeños que el tanque modelo por los criterios definidos con anterioridad. Los tanques mencionados, son iguales geométricamente.

$$T2B=T2E$$

$$T2 = T' - T' \times \frac{5}{100}$$

$$T2 = \frac{42500}{3} - \frac{42500}{3} \times 0,05 = \frac{40375}{3} = 13458,33 m^3$$

Calculamos una constante K para dimensionar los tanques T3B, T3E, T4B, T4E, T5B, T5E. Esta constante será el tanto por ciento de volumen rebajado de cada tanque, dividido por el número de tanques a dimensionar, en este caso seis tanques.

Calculamos la K1 que es el volumen quitado a los tanques T1B, T1E, T6B y T6E

$$K1 = T' \times \frac{15}{100} = \frac{42500}{3} \times 0,15 = 2125 m^3$$

$$K1B=K1E=K6B=K6E$$

Calculamos la K3 que es el volumen quitado a los tanques T2B y T2E.

$$K2 = T' \times \frac{5}{100} = \frac{42500}{3} \times 0,05 = \frac{2125}{3} = 708,33m^3$$

K2B=K2E

Una vez dimensionado el coeficiente de reducción de cada tanque, nos disponemos a calcular la K que añadiremos a los tanques T3B, T3E, T4B, T4E, T5B y T5E. Esta, será igual a:

$$K = \frac{(K1 \times 4) + (K2 \times 2)}{\text{número de tanques a dimensionar}}$$

$$K = \frac{(2125 \times 4) + (\frac{2125}{3} \times 2)}{6} = \frac{14875}{9} = 1652,777m^3$$

Después de haber calculado el coeficiente de reducción, podemos calcular el volumen de los tanques:

$$T3B=T3E=T4B=T4E=T5B=T5E$$

$$T3 = T' + K$$

$$T3 = T' + K = \frac{42500}{3} + \frac{14875}{9} = 15819,444m^3$$

El último paso, es la comprobación del dimensionamiento llevado a cabo.

Capacidad de carga teórica del buque: Cc=170000m³

Capacidad de carga teórica calculada: Ct

$$Ct = (T1 \times 4) + (T3 \times 2) + (T5 \times 6)$$

$$Ct = \left(\frac{36125}{3} \times 4\right) + \left(\frac{40375}{3} \times 2\right) + \left(\frac{142735}{9} \times 6\right)$$

$$Ct = 170000m^3$$

La capacidad de carga teórica calculada es correcta ya que se cumple la igualdad.

$$Ct=CC$$

Para calcular el parámetro a tendremos en cuenta la eslora del buque. Esta es igual a 267m según las particularidades técnicas del buque.

Para realizar el dimensionamiento del parámetro a tenemos en cuenta la parte de la eslora que es ocupada por los tanques. Medida sobre el plano del buque ésta es igual a 15cm. A continuación, medimos sobre plano la eslora total del buque; siendo igual a 20cm.

Mediante una regla de proporcionalidad podemos saber aproximadamente la parte que es ocupada por los tanques dentro de la eslora real del buque.

$$\frac{267}{x} = \frac{20cm}{15cm}$$

$$x = \frac{267m \times 15cm}{20cm} = 200,25m$$

Podemos decir que la parte de la eslora ocupada por los tanques es de 200,25 m.

A continuación, aplicamos el mismo método de cálculo para dimensionar el parámetro a_x en función de cada tanque. Los criterios para definir a que tanque asignamos más o menos longitud de a_x son los mismos que en el dimensionamiento volumétrico realizado anteriormente.

$$a' = \frac{x}{\text{número de divisiones}}$$

$$a' = \frac{200,25}{6} = 33,375m$$

Definimos el parámetro a de los tanques $a_{1B} = a_{1E} = a_{6B} = a_{6E}$ un quince por ciento (15%) más pequeño que el parámetro a' del tanque modelo por los criterios definidos con anterioridad. Los tanques mencionados son iguales geométricamente.

$$a_{1B} = a_{1E} = a_{6B} = a_{6E}$$

$$a_1 = a' - a' \times \left(\frac{15}{100}\right)$$

$$a_1 = 33,375 - 33,375 \times \left(\frac{15}{100}\right)$$

$$a_1 = \frac{4539}{160} = 28,37 \text{ m}$$

Definimos el parámetro a de los tanques $a_{2B} = a_{2E}$ un cinco por ciento (5%) más pequeño que el parámetro a' del tanque modelo por los criterios definidos con anterioridad. Los tanques mencionados, son iguales geométricamente.

$$a_{2B} = a_{2E}$$

$$a_2 = a' - a' \times \left(\frac{5}{100}\right)$$

$$a_2 = 33,375 - 33,375 \times \left(\frac{5}{100}\right)$$

$$a_2 = \frac{5073}{160} = 31,70 \text{ m}$$

Una vez dimensionado el parámetro a de los tanques anteriores, nos disponemos a calcular la Ka_3 que añadiremos a los tanques T3B, T3E, T4B, T4E, T5B y T5E.

Esta será igual a:

$$Ka_1 = a' - a' \times \left(\frac{15}{100}\right)$$

$$Ka_1 = 33,375 - 33,375 \times \left(\frac{15}{100}\right) = \frac{801}{160} = 5,00 \text{ m}$$

$$Ka_2 = a' - a' \times \left(\frac{5}{100}\right)$$

$$Ka_2 = 33,375 - 33,375 \times \left(\frac{5}{100}\right) = \frac{267}{160} = 1,67m$$

$$Ka_{3B} = Ka_{3E} = Ka_{4B} = Ka_{4E} = Ka_{5B} = Ka_{5E}$$

$$Ka_3 = \frac{(Ka_1 \times 2) + (Ka_2 \times 1)}{\text{número de divisiones a dimensionar}}$$

$$Ka_3 = \frac{(5,00 \times 2) + (1,67 \times 1)}{3} = 3,89m$$

Comprobación del dimensionamiento.

Eslora total ocupada por los tanques (calculada anteriormente) $a_t = 200,25m$

$$a_{calculada} = (a_1 \times 2) + (a_3 \times 1) + (a_5 \times 3)$$

$$a_{calculada} = \left(\frac{4539}{160} \times 2\right) + \left(\frac{5073}{160} \times 1\right) + \left(\frac{7456}{200} \times 3\right)$$

$$a_{calculada} = 200,25 = a_t$$

Una vez calculada la constante Ka_3 , podemos dimensionar a_3 de los tanques T3B, T3E, T4B, T4E, T5B y T5E. Esta constante será el tanto por ciento de la longitud rebajada del parámetro a de cada tanque y dividido por el número de divisiones en que este parámetro divide los tanques, en este caso tres divisiones.

$$a_{3B} = a_{3E} = a_{4B} = a_{4E} = a_{5B} = a_{5E}$$

$$a_3 = a' + Ka_3$$

$$a_3 = 33,375 + 3,89 = \frac{7453}{200} = 37,265m$$

Una vez se ha dimensionado el volumen y el parámetro a , vamos a definir la altura de este. Teóricamente, definimos que $h=20m$. El puntal total del buque es de 23,3 m del fondo hasta la cubierta superior. Restando el espacio del doble casco y otros, podemos aproximarnos a 20m. Por lo tanto, tenemos que:

$$h=20m$$

Una vez definidos los parámetros (V , a , h) solo nos queda definir el parámetro b . Este parámetro lo obtenemos mediante la resolución de la formula $V= a \times b \times h$. De aquí, aislamos, matemáticamente, el parámetro b . Mediante la resolución de los cálculos se observa que este parámetro también será un parámetro igual en todos los tanques.

Formula general:

$$V = a \times b \times h$$

$$b = \frac{V}{a \times h}$$

Calculamos el parámetro b de los tanques T1B, T1E, T6B y T6. Se ha de tener en cuenta que $a_1 = 28,37m$ y $V=T1$

$$b = \frac{V}{a_1 \times h} = \frac{T1}{a_1 \times h}$$

$$b = \frac{12041,66}{28,37 \times 20} = 21,22m$$

Calculamos el parámetro b de los tanques T2B y T2E. Se ha de tener en cuenta que $a_3 = 31,70m$ y $V=T2$,

$$b = \frac{V}{a_3 \times h} = \frac{T2}{a_3 \times h}$$

$$b = \frac{13458,33}{31,70 \times 20} = 21,22m$$

Calculamos el parámetro b de los tanques T3B, T3E, T4B, T4E, T5B y T5E. Se ha de tener en cuenta que $a_3 = 37,265m$ y $V=T3$

$$b = \frac{V}{a_3 \times h} = \frac{T3}{a_3 \times h}$$

$$b = \frac{15819,44}{37,265 \times 20} = 21,22m$$

3. Cálculo de las pérdidas térmicas en los tanques

Las pérdidas térmicas se pueden calcular sin dificultad a partir de la formula básica de transmisión del calor. Cualquiera que sea el método usado, el resultado nunca puede darse como exacto ya que existe siempre la dificultad de calcular con exactitud el coeficiente de transmisión de calor. Una vez elegido el coeficiente de transmisión, podemos calcular las pérdidas térmicas. (1)

En la práctica, las pérdidas térmicas nos vienen dadas por la fórmula siguiente:

$$Q = U \times A \times (T_1 - T_2)$$

Q = cantidad de calor (kilocalorías)

U = coeficiente de transmisión de calor de las paredes del tanque (kcal/m²h°C)

A = superficie del tanque (m²)

T_1 = temperatura del interior del tanque (°C)

T_2 = temperatura exterior del tanque (°C) (aire, mar o espacios interiores)

Ahora definiremos las pérdidas en los tanques:

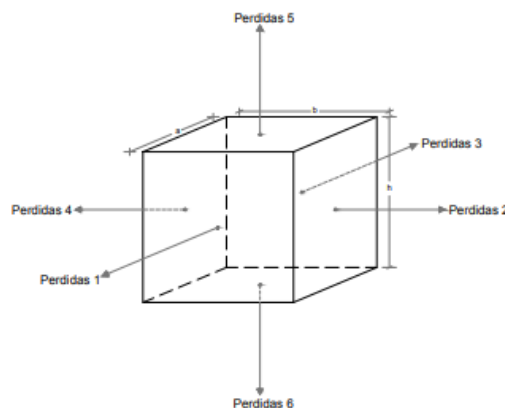


Figura14. Esquema pérdidas térmicas tanque Fuente: propia

Dependiendo de la posición del tanque la pérdida térmica podrá ser hacia la mar, hacia otro tanque o hacia el aire. Esto se especifica en el cálculo de pérdidas térmicas de cada tanque. Los tanques son simétricos, por lo tanto, siempre se realizará el cálculo de un tanque y se extrapolará a los otros por la condición de simetría, de esta forma la realización de los cálculos es más sencilla.

Es importante comentar que el valor del coeficiente de transmisión de calor (U), puede variar en un amplio rango debido a la estrecha relación que existe entre la temperatura y la viscosidad. Por ejemplo, el contacto del petróleo sobre las paredes del tanque, puede dar paso a la formación de una película aislante en las paredes del tanque. Esto dificulta la elección del coeficiente de transmisión de calor.

Para aceites pesados y crudos podemos tomar una cifra que varía entre 5 o 7 $kcal/m^2h^{\circ}C$. Debido al pequeño francobordo de los petroleros, es razonable suponer que todo el costado es superficie en contacto agua de mar.

Para el coeficiente de transmisión de la parte superior se toma 7 $kcal/m^2h^{\circ}C$. Dicho coeficiente ya tiene en cuenta una cierta velocidad de circulación del aire. Por otro lado, también se contempla que una cara del tanque está en contacto con la mar. En este caso, se toma como referencia un coeficiente de transmisión de calor igual a 5 $kcal/m^2h^{\circ}C$. Siempre tomamos como nula la transmisión de calor de tanque a tanque aunque en realidad, las temperaturas pueden ser algo distintas.

Pérdidas 1 tanques T3B-T3E-T4B-T4E-T5B-T5E

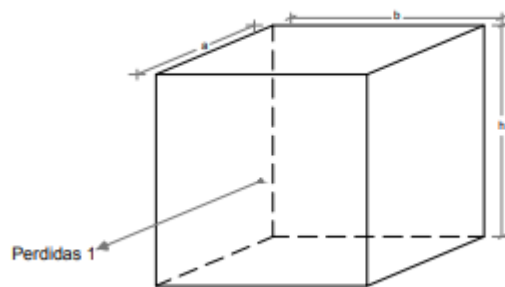


Figura15: Esquema pérdidas 1 Fuente: propia

$$Q_1 = U \times A \times (T_1 - T_2)$$

$$Q_1 = 0 \text{ kcal}$$

Se consideran pérdidas térmicas nulas ya que son pérdidas hacia el tanque adyacente o a los espacios interiores. Se supone que los tanques están a la misma temperatura y, por lo tanto, no puede haber transferencia de calor.

Pérdidas 2 tanques T3B-T3E-T4B-T4E-T5B-T5E

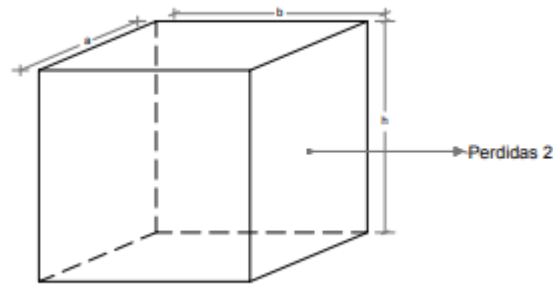


Figura16: Esquema pérdidas 1 Fuente: propia

Se consideran pérdidas térmicas a través del casco del buque hacia la mar. En todos los cálculos realizados se ponen unas condiciones externas y adversas para realizar un cálculo con un margen de seguridad.

$$Q = U \times A \times (T_1 - T_2)$$

$$U = 5 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$A = a \times h = 37,265 \times 20 = 745,3 \text{ m}^2$$

$$T_1 = 43^\circ\text{C} \quad T_2 = 2^\circ\text{C}$$

Parámetros	a	h	U	T1	T2	Q= UxAx(T1-T2)
T3B	37,265	20	5	43	2	152.786,50
T3E	37,265	20	5	43	2	152.786,50
T4B	37,265	20	5	43	2	152.786,50
T4E	37,265	20	5	43	2	152.786,50
T5B	37,265	20	5	43	2	152.786,50
T5E	37,265	20	5	43	2	152.786,50
Total	-	-	-	-	-	916.719,00

Tabla2. Cálculo pérdidas 2 Fuente: propia

$$Q_2 = 916719,0 \text{ kcal/h}$$

Pérdidas 3 tanques T3B-T3E-T4B-T4E-T5B-T5E

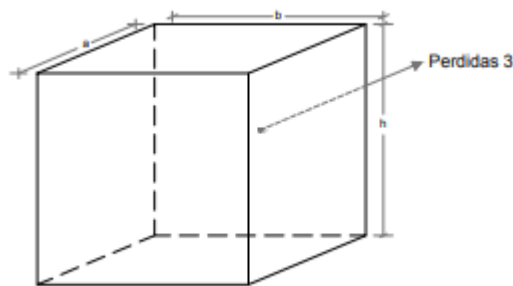


Figura17: Esquema pérdidas 3 Fuente: propia

$$Q_3 = U \times A \times (T_1 - T_2)$$

$$Q_3 = 0 \text{ kcal/h}$$

Se consideran pérdidas térmicas nulas ya que son pérdidas al tanque adyacente o espacios interiores. Se supone que los tanques están a la misma temperatura y, por lo tanto, no puede haber transferencia de calor.

Pérdidas 4 tanques T3B-T3E-T4B-T4E-T5B-T5E

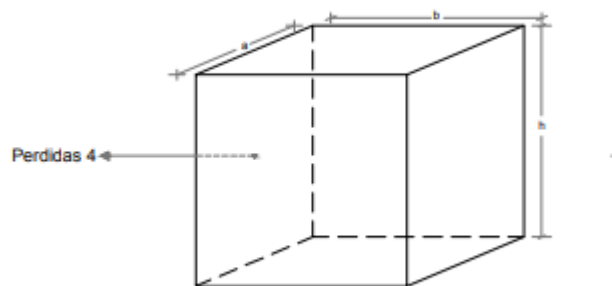


Figura18: Esquema pérdidas 4 Fuente: propia

$$Q_4 = 0 \text{ kcal/h}$$

Se consideran pérdidas térmicas nulas ya que son pérdidas al tanque adyacente o espacios interiores. Se supone que los tanques están a la misma temperatura por lo tanto no puede haber transferencia de calor.

Pérdidas 5 tanques T3B-T3E-T4B-T4E-T5B-T5E

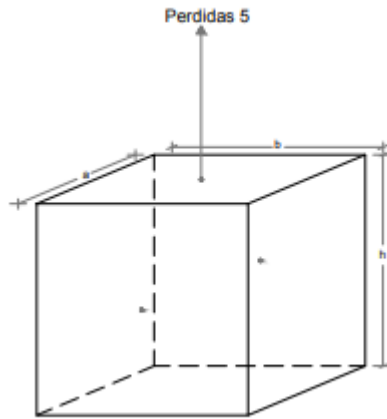


Figura19: Esquema pérdidas 5 Fuente: propia

Se consideran pérdidas térmicas del tanque hacia el aire. En todos los cálculos realizados se ponen unas condiciones externas y adversas para realizar un cálculo con un margen de seguridad.

$$Q = U \times A \times (T_1 - T_2)$$

$$U = 7 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$A = a \times h = 37,265 \times 21,22 = 790,76 \text{ m}^2$$

$$T_1 = 43^\circ\text{C} \quad T_2 = -1^\circ\text{C}$$

Parametros	a	b	U	T1	T2	Q= UxAx(T1-T2)
T3B	37,265	21,22	7	43	-1	243.555,10
T3E	37,265	21,22	7	43	-1	243.555,10
T4B	37,265	21,22	7	43	-1	243.555,10
T4E	37,265	21,22	7	43	-1	243.555,10
T5B	37,265	21,22	7	43	-1	243.555,10
T5E	37,265	21,22	7	43	-1	243.555,10
Total	-	-	-	-	-	1.461.330,58

Tabla3. Cálculo pérdidas 5 Fuente: propia

$$Q_5 = 1461330,58 \text{ kcal/h}$$

Pérdidas 6 tanques T3B-T3E-T4B-T4E-T5B-T5E

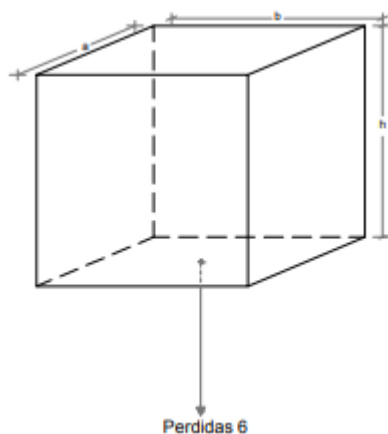


Figura20: Esquema pérdidas 6 Fuente: propia

Se consideran pérdidas térmicas del casco hacia la mar. En todos los cálculos realizados se ponen unas condiciones externas y adversas para realizar un cálculo con un margen de seguridad.

$$Q = U \times A \times (T_1 - T_2)$$

$$U = 5 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$A = a \times b = 37,265 \times 21,22 = 790,76\text{m}^2$$

$$T_1 = 43^\circ\text{C} \quad T_2 = 2^\circ\text{C}$$

Parámetros	a	b	U	T1	T2	Q= UxAx(T1-T2)
T3B	37,265	21,22	5	43	2,00	162.106,48
T3E	37,265	21,22	5	43	2,00	162.106,48
T4B	37,265	21,22	5	43	2,00	162.106,48
T4E	37,265	21,22	5	43	2,00	162.106,48
T5B	37,265	21,22	5	43	2,00	162.106,48
T5E	37,265	21,22	5	43	2,00	162.106,48
Total	-	-	-	-	-	972638,859

Tabla4. Cálculo pérdidas 6 Fuente: propia

$$Q_6 = 972638,859 \text{ kcal/h}$$

Pérdidas 1 tanques T2B-T2E

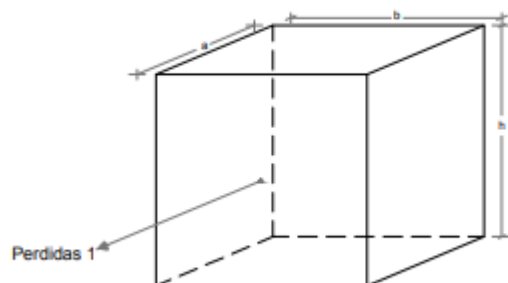


Figura15: Esquema pérdidas 1 Fuente: propia

$$Q_1 = U \times A \times (T_1 - T_2)$$

$$Q_1 = 0 \text{ kcal/h}$$

Se consideran pérdidas térmicas nulas ya que son pérdidas hacia el tanque adyacente o espacios interiores. Se supone que los tanques están a la misma temperatura y, por lo tanto, no puede haber transferencia de calor.

Pérdidas 2 T2B-T2E

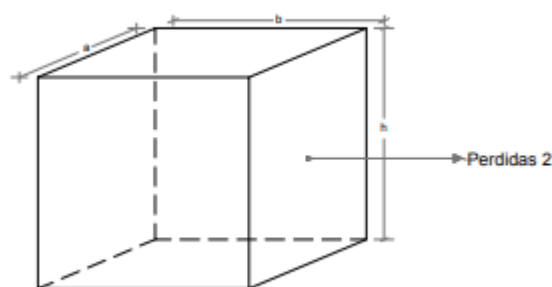


Figura16: Esquema pérdidas 1 Fuente: propia

Se consideran pérdidas térmicas a través del casco del buque hacia la mar. En todos los cálculos realizados se ponen unas condiciones externas y adversas para realizar un cálculo con un margen de seguridad.

$$Q = U \times A \times (T_1 - T_2)$$

$$U = 5 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$A = a \times h = 31,706 \times 20 = 754,12 \text{ m}^2$$

$$T_1 = 43^\circ\text{C} \quad T_2 = 2^\circ\text{C}$$

Parámetros	a	h	U	T1	T2	Q= UxAx(T1-T2)
T2B	31,706	20	5	43	2	129994,6
T2E	31,706	20	5	43	2	129994,6
Total	-	-	-	-	-	259989,2

Tabla5. Cálculo pérdidas 2 Fuente: propia

$$Q_2 = 259989,20 \text{ kcal/h}$$

Pérdidas 3 tanques T2B-T2E

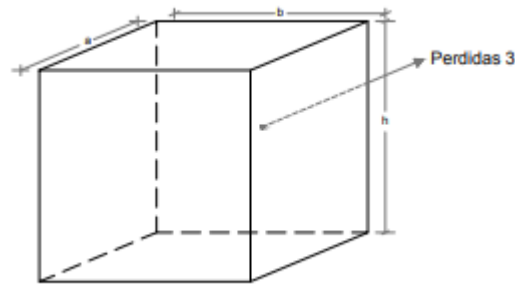


Figura17: Esquema pérdidas 2 Fuente: propia

$$Q_3 = U \times A \times (T_1 - T_2)$$

$$Q_3 = 0 \text{ kcal/h}$$

Se consideran pérdidas térmicas nulas ya que son perdidas hacia el tanque adyacente o espacios interiores. Se supone que los tanques están a la misma temperatura y, por lo tanto, no puede haber transferencia de calor.

Pérdidas 4 tanques T2B-T2E

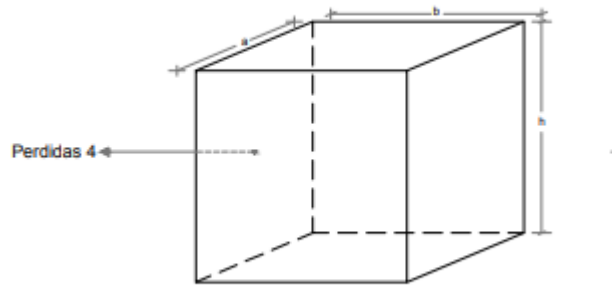


Figura18: Esquema pérdidas 1 Fuente: propia

$$Q_4 = 0 \text{ kcal/h}$$

Se consideran pérdidas térmicas nulas ya que son pérdidas hacia el tanque adyacente o espacios interiores. Se supone que los tanques están a la misma temperatura y, por lo tanto, no puede haber transferencia de calor.

Pérdidas 5 tanques T2B-T2E

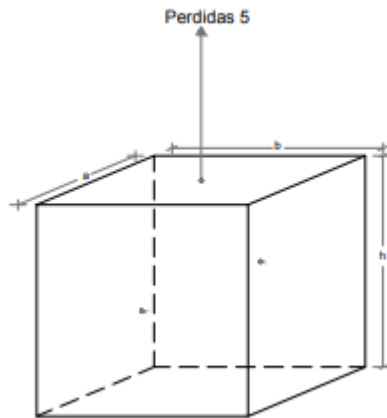


Figura19: Esquema pérdidas 5 Fuente: propia

Se consideran pérdidas térmicas a través del tanque hacia el aire. En todos los cálculos realizados se ponen unas condiciones externas y adversas para realizar un cálculo con un margen de seguridad.

$$Q = U \times A \times (T_1 - T_2)$$

$$U = 7 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$A = a \times h = 31,706 \times 21,22 = 672,80\text{m}^2$$

$$T_1 = 43^\circ\text{C} \quad T_2 = -1^\circ\text{C}$$

Parámetros	a	b	U	T1	T2	Q= UxAx(T1-T2)
T2B	31,706	21,22	7	43	-1	207222,8066
T2E	31,706	21,22	7	43	-1	207222,8066
Total	-	-	-	-	-	414445,6131

Tabla6. Cálculo pérdidas 5 Fuente: propia

$$Q_5 = 414445,61 \text{ kcal/h}$$

Perdidas 6 tanques T2B-T2E

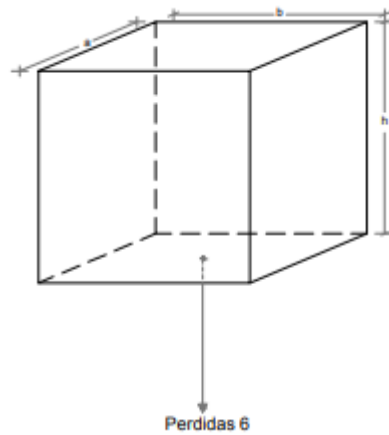


Figura20: Esquema pérdidas 1 Fuente: propia

Se consideran pérdidas térmicas del casco hacia la mar. En todos los cálculos realizados se ponen unas condiciones externas y adversas para realizar un cálculo con un margen de seguridad.

$$Q = U \times A \times (T_1 - T_2)$$

$$U = 5 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$A = a \times b = 37,265 \times 21,22 = 790,76\text{m}^2$$

$$T_1 = 43^\circ\text{C} \quad T_2 = 2^\circ\text{C}$$

Parámetros	a	b	U	T1	T2	Q= UxAx(T1-T2)
T2B	31,706	21,22	5	43	15,5	92510,1815
T2E	31,706	21,22	5	43	15,5	92510,1815
Total	-	-	-	-	-	185020,363

Tabla7. Cálculo pérdidas 6 Fuente: propia

$$Q_6 = 185020,363 \text{ kcal/h}$$

Pérdidas 1 tanques T1B-T1E-T6B-T6E

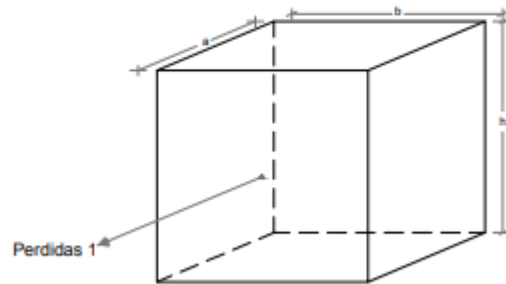


Figura15: Esquema pérdidas 1 Fuente: propia

$$Q_1 = U \times A \times (T_1 - T_2)$$

$$Q_1 = 0 \text{ kcal/h}$$

Se consideran pérdidas térmicas nulas ya que son pérdidas hacia el tanque adyacente o espacios interiores. Se hace la aproximación que los tanques están a la misma temperatura y, por lo tanto, no puede haber transferencia de calor.

Pérdidas 2 tanques T1B-T1E-T6B-T6E

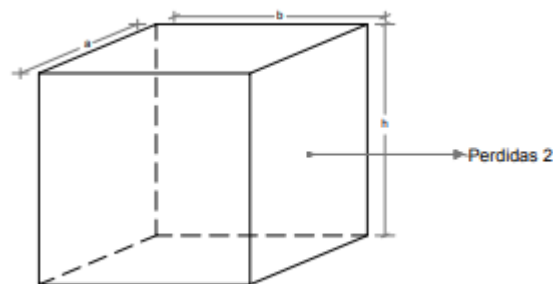


Figura16: Esquema pérdidas 2 Fuente: propia

Se consideran pérdidas térmicas a través del casco del buque hacia la mar. En todos los cálculos realizados se ponen unas condiciones externas y adversas para realizar un cálculo con un margen de seguridad.

$$Q = U \times A \times (T_1 - T_2)$$

$$U = 5 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$A = a \times h = 37,265 \times 20 = 745,3 \text{ m}^2$$

$$T_1 = 43^\circ\text{C} \quad T_2 = 2^\circ\text{C}$$

Parámetros	a	h	U	T1	T2	Q= UxAx(T1-T2)
T1B	28,368	20	5	43	2	116308,8
T1E	28,368	20	5	43	2	116308,8
T6B	28,368	20	5	43	2	116308,8
T6E	28,368	20	5	43	2	116308,8
Total	-	-	-	-	-	465235,2

Tabla8. Cálculo pérdidas 2 Fuente: propia

$$Q_2 = 465235,2 \text{ kcal/h}$$

Pérdidas 3 tanques T1B-T1E-T6B-T6E

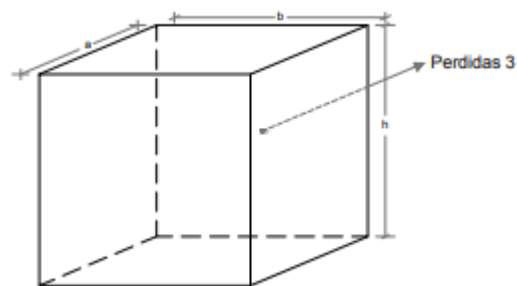


Figura17: Esquema pérdidas 3 Fuente: propia

$$Q_3 = U \times A \times (T_1 - T_2)$$

$$Q_3 = 0 \text{ kcal/h}$$

Se consideran pérdidas térmicas nulas ya que son pérdidas hacia el tanque adyacente o espacios interiores. Se hace la aproximación que los tanques están a la misma temperatura y, por lo tanto, no puede haber transferencia de calor.

Pérdidas 4 tanques T1B-T1E-T6B-T6E

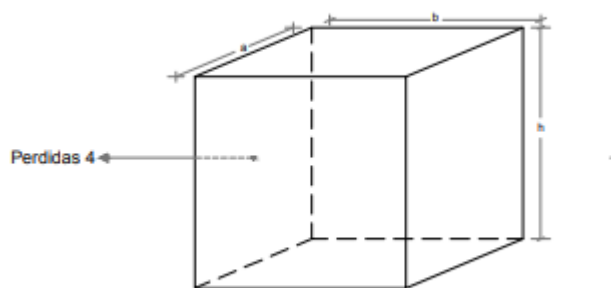


Figura18. Esquema pérdidas 4 Fuente: propia

$$Q_4 = 0 \text{ kcal/h}$$

Se consideran pérdidas térmicas nulas ya que son pérdidas hacia el tanque adyacente o espacios interiores. Se supone que los tanques están a la misma temperatura y, por lo tanto, no puede haber transferencia de calor.

Pérdidas 5 tanques T1B-T1E-T6B-T6E

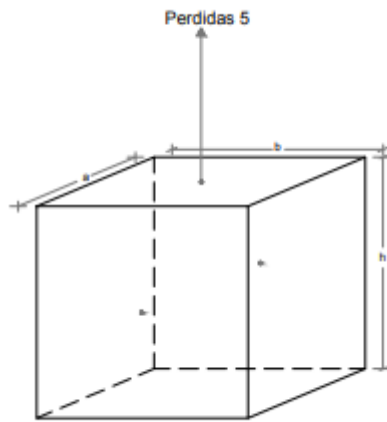


Figura19: Esquema pérdidas 5 Fuente: propia

Se consideran pérdidas térmicas a través del tanque hacia el aire. En todos los cálculos realizados se ponen unas condiciones externas y adversas para realizar un cálculo con un margen de seguridad.

$$Q = U \times A \times (T_1 - T_2)$$

$$U = 5 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$A = a \times h = 28,368 \times 21,22 = 601,96 \text{ m}^2$$

$$T_1 = 43^\circ\text{C} \quad T_2 = -1^\circ\text{C}$$

Parámetros	a	h	U	T1	T2	Q= UxAx(T1-T2)
T1B	28,368	20	5	43	-1	124819,2
T1E	28,368	20	5	43	-1	124819,2
T6B	28,368	20	5	43	-1	124819,2
T6E	28,368	20	5	43	-1	124819,2
Total	-	-	-	-	-	499276,8

Tabla9. Cálculo pérdidas 5 Fuente: propia

$$Q_5 = 499276,8 \text{ kcal/h}$$

Pérdidas 6 tanques T2B-T2E

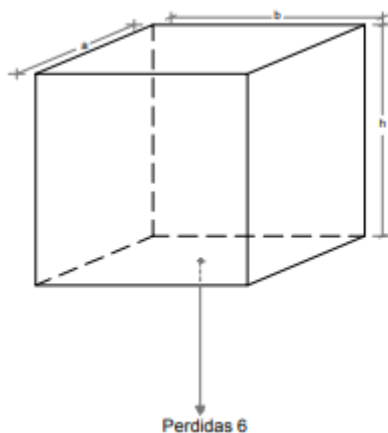


Figura20: Esquema pérdidas 6 Fuente: propia

Se consideran pérdidas térmicas del casco hacia la mar. En todos los cálculos realizados se ponen unas condiciones externas y adversas para realizar un cálculo con un margen de seguridad.

$$Q = U \times A \times (T_1 - T_2)$$

$$U = 5 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$A = a \times b = 37,265 \times 21,22 = 790,76\text{m}^2$$

$$T_1 = 43^\circ\text{C} \quad T_2 = 2^\circ\text{C}$$

Parámetros	a	b	U	T1	T2	Q= UxAx(T1-T2)
T1B	28,368	21,22	5	43	2	123403,6368
T1E	28,368	21,22	5	43	2	123403,6368
T6B	28,368	21,22	5	43	2	123403,6368
T6E	28,368	21,22	5	43	2	123403,6368
Total	-	-	-	-	-	493614,5472

Tabla10. Cálculo pérdidas 6 Fuente: propia

$$Q_6 = 493614,547 \text{ kcal/h}$$

Balance total de pérdidas en todos los tanques.

	Pérdidas 2	Pérdidas 5	Pérdidas 6	
T1B	116308,8	124819,2	123403,6368	
T1E	116308,8	124819,2	123403,6368	
T2E	129994,6	207222,81	92510,1815	
T2B	129994,6	207222,81	92510,1815	
T3B	152786,5	243555,1	243555,0964	
T3E	152786,5	243555,1	243555,0964	
T4B	152786,5	243555,1	243555,0964	
T4E	152786,5	243555,1	243555,0964	
T5B	152786,5	243555,1	243555,0964	
T5E	152786,5	243555,1	243555,0964	
T6B	116308,8	124819,2	123403,6368	
T6E	116308,8	124819,2	123403,6368	
Total	1641943,4	2375053	2139965,489	6156961,88

Tabla11. Cálculo pérdidas totales Fuente: propia

$$Q_{p\acute{e}rdidas} = 6156961,88 \text{ kcal/h}$$

4. Balance del consumo de las turbobombas

En este punto se hace una aproximación del vapor que consumen las turbobombas de carga-descarga. El buque MILOS tiene 3 turbobombas de carga-descarga con un caudal máximo de $3000 \text{ m}^3/\text{h}$. Estos datos están extraídos de las características técnicas del buque.

El cálculo del vapor consumido por las turbobombas se realiza con el criterio de que todas las bombas del buque están trabajando a plena carga. De esta forma, se asegura que el dimensionamiento del generador de vapor será seguro y el vapor que genere, siempre será el suficiente. (6)

Consumo específico de una bomba:

TipoKVL 450-3

Capacidad3000 m³/h

Velocidad de rotación1330 rpm

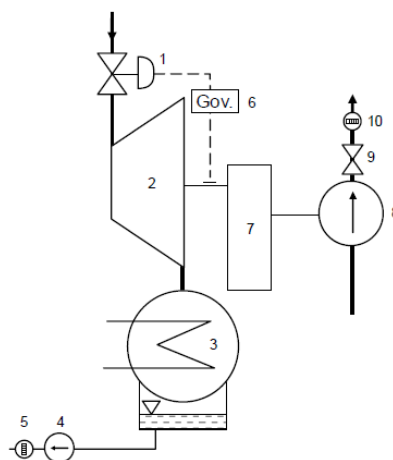


Figura 21. Turbobomba Fuente (3)

1-Válvula de control. 2-Turbina de vapor. 3-Condensador. 4-Bomba. 5-Descarga del condensado.

6- Controlador de velocidad. 7-Reducción. 8-Bomba de carga. 9-Válvula de paso.

No. of point	Consumption of steam	Steam pressure before control valve	Steam pressure after control valve	Pressure in turbine condenser	Volumetric flow rate of water	Total head of pump
	D_p [kg/h]	p_p [MPa]	P_c [MPa]	P_w [kPa]	Q_w [m ³ /h]	H [m.w.c.]
1	9 486	1.43	0.86	31.8	764	163.96
2	11 548	1.41	1.05	33.2	1 665	156.79
3	12 826	1.41	1.19	33.7	2 378	144.70
4	13 981	1.43	1.30	33.3	3 043	130.88
5	14 113	1.43	1.32	33.4	3 205	126.09

Tabla12. Consumo turbobomba 2 Fuente: (3)

El consumo de vapor elegido es el de No5. Coincide con el consumo máximo.

$$\text{Consumo específico} = 14113 \text{ kg/h}$$

$$\text{Consumo total bombas} = \text{Consumo específico} \times 3$$

$$\text{Consumo total bombas} = 14113 \times 3$$

$$\text{Consumo total bombas} = 42339 \frac{\text{kg vapor}}{\text{h}}$$

5. Balance total del vapor consumido

En este apartado se realiza el sumatorio del vapor necesario para compensar las pérdidas térmicas y el consumo de las bombas. Primero, se calcula en kW el total de pérdidas térmicas con las equivalencias mostradas a continuación. Paralelamente, tenemos el consumo de las bombas del buque que nos viene determinado en kg de vapor/ hora.

$$Q_{\text{total pérdidas térmicas}} = 6156961,88 \text{ kcal/h}$$

$$859,85 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = 1 \text{ kW}$$

$$859,85 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times \frac{4182,8 \text{ J}}{1 \text{ kcal}} \cong 1000 \text{ W} = 1 \text{ kW}$$

$$Q_{\text{total pérdidas térmicas}} = 6156961,88 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times \frac{4182,8 \text{ J}}{1 \text{ kcal}} = 7153705,6 \text{ W}$$

$$Q_{\text{total pérdidas térmicas}} = 7153,70 \text{ kW}$$

El consumo de vapor para el funcionamiento a plena carga de las tres turbobombas:

$$Q_{\text{total bombas}} = 42339 \text{ kg vapor/h}$$

6. Cálculo de la superficie del serpentín

La determinación del área necesaria del serpentín de vapor se determina mediante un cálculo sencillo. Tenemos las pérdidas térmicas totales y, por lo tanto, el único cálculo que debemos realizar, es aislar la A que representa el área total de metros cuadrados de serpentín que tendremos que poner distribuidos en los tanques.

$$Q = U \times A \times (T_1 - T_2)$$

$$A = \frac{Q}{(T_1 - T_2) \times U}$$

Pérdidas 2 totales

$$U = 5 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 43^\circ\text{C} \quad T_2 = 2^\circ\text{C}$$

$$Q_{\text{total pérdidas 2}} = 1641943,4 \text{ kcal/h}$$

$$A_2 = \frac{1641943,4}{(43 - 2) \times 5} = 8009,48 \text{ m}^2$$

Pérdidas 5

$$U = 7 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 43^\circ\text{C} \quad T_2 = -1^\circ\text{C}$$

$$Q_{\text{total pérdidas 5}} = 2375053 \text{ kcal/h}$$

$$A_5 = \frac{2375053}{(43 - (-1)) \times 5} = 10795,7 \text{ m}^2$$

Pérdidas 6

$$U = 5 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 43^\circ\text{C} \quad T_2 = 2^\circ\text{C}$$

$$Q_{\text{total pérdidas 6}} = 2139965,489 \text{ kcal/h}$$

$$A_6 = \frac{2139965,489}{(43 - 2) \times 5} = 10438,8 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{total}} = A_2 + A_5 + A_6$$

$$A_{\text{total}} = 8009,48 + 10795,7 + 10438,8 = 29243,98 \text{ m}^2$$

6.1 Distribución del sistema de serpentines en buques petroleros

El proyecto de la disposición de los serpentines de vapor en buques petroleros no ofrece mucha dificultad técnica. Estos serpentines se instalan de manera que sirven de medio calefactor del crudo. Para que este sistema sea efectivo, la longitud y diámetro del serpentín deberá ser la requerida.

Aparte de esto debemos tener en cuenta que durante la instalación del sistema no nos queden zonas frías ya que esto, produciría zonas donde la temperatura del producto sería demasiado alta y zonas donde el producto tendría una temperatura demasiado baja. La separación entre los serpentines de los tanques no deberá exceder el metro así aseguramos el funcionamiento correcto de toda la instalación de serpentines. En cargas especiales, se ha de hacer acorde con la experiencia técnica.

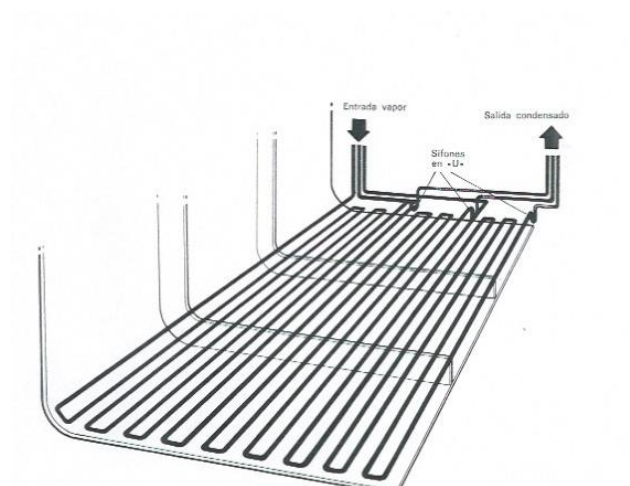


Figura22. Disposición serpentines en un tanque Fuente: (1)

Las elevaciones sobre la estructura del buque deben evitarse ya que cualquier curva o recorrido extra, significa pérdidas de carga que, a su vez, es acumulación de condensado. A mayores pérdidas de carga, mayor acumulación de condensado con el riesgo de que se produzcan golpes de ariete, cosa que puede producir fugas en la instalación.

Para conseguir una mayor eficacia, se suelen instalar serpentines a modo de parrilla. La parrilla consiste en un colector de entrada de vapor y un colector de salida de vapor. Estos, van unidos por una serie de tuberías de corta longitud. Si hacemos este tipo de disposición, podemos instalar una longitud mayor. Si una parrilla está mal diseñada, el vapor tenderá a pasar con preferencia por uno a varios tramos de unión

entre los colectores, disminuyendo el flujo en los restantes. Debemos asegurar una misma presión a la entrada de todos los tramos para obtener el mismo flujo en estos.

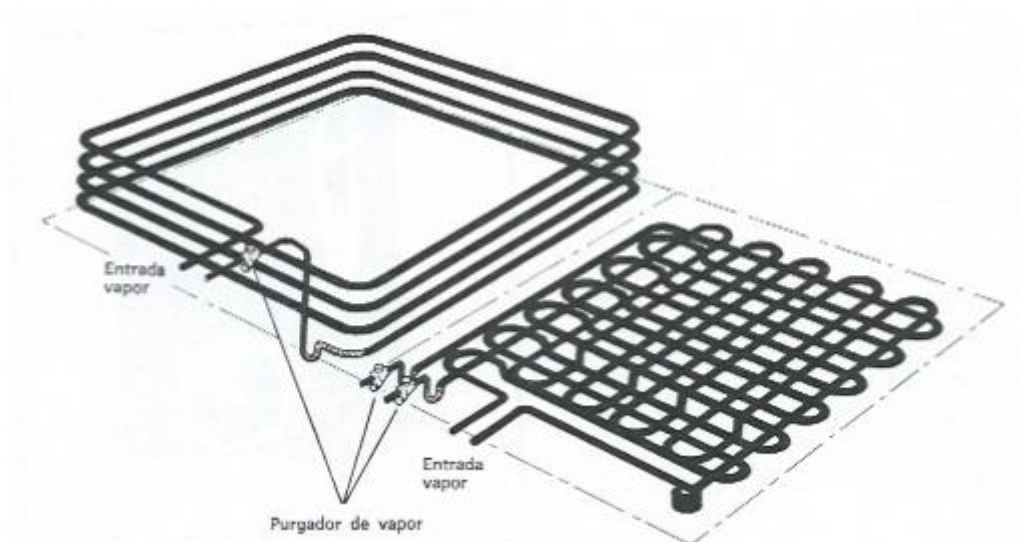


Figura23. Serpentín tipo parrilla Fuente: (1)

6.2 Purga de condensado

Aparte de hacer un buen dimensionado y disposición de los serpentines, es muy importante la elección del tipo de purgador. Lo más importante es entender el funcionamiento de los purgadores y elegir el tipo adecuado.

Existen dos tipos principales de purgadores:

- 1.- Los purgadores termostáticos que operan teniendo presente el cambio de temperatura. Cuando el vapor se condensa, se forma agua que inmediatamente empieza a enfriarse. El purgador es sensible a este cambio de temperatura abriendo la descarga del condensado. La característica principal de este tipo de purgador es que retiene el condensado hasta que se ha enfriado unos grados por debajo de la temperatura del vapor.
- 2.- Los purgadores mecánicos que operan atendiendo el principio de diferencia de densidades entre vapor y condensado, usando una boya o cubeta. Tienen la ventaja que su funcionamiento no se ve afectado por cambios de presión ni temperatura. Se usan para aplicaciones donde existen grandes caudales. (1)

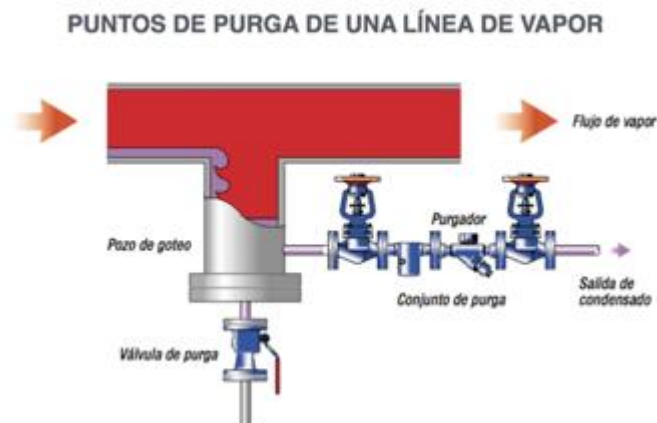


Figura 25. Sistema de purga de líneas de vapor Fuente: <https://vaporparalaindustria.com/sistema-purga-lineas-vapor-industrial/>

7. Elección del generador de vapor

Una vez realizado todo el balance térmico, sólo nos queda elegir el generador de vapor que cumpla con todos los requisitos calculados en el dimensionamiento anterior. El generador de vapor elegido, tiene que ser capaz de producir los kilogramos de vapor por hora necesarios para asegurar el funcionamiento de las tres turbobombas, trabajando a plena carga y, a la vez, compensando las pérdidas térmicas que se producen en los tanques.

Se ha elegido una generador tipo D del fabricante Alfa-Laval. A continuación, se muestra la tabla con las distintas potencias que se pueden elegir de este generador de vapor.

Standard product range					Capacity and dimensions			
Steam capacity	Design pressure	Thermal output at 100% MCR	Height K (incl retraction of burner lance)	Total lenght L	Hight H	Width B (steam drum+200)	Boiler dry weight *)	Boiler operation weight
kg	bar (g)	kW	mm	mm	mm	mm	ton	ton
25,000	18	17,600	9,170	4,309	6,280	3,837	31.6	39.6
35,000	18	24,700	9,520	4,583	6,980	4,187	38.2	48.6
45,000	18	31,800	9,870	5,050	8,080	4,875	44.2	57.0
55,000	18	38,800	10,370	5,413	8,480	5,131	50.6	65.7
70,000	18	49,400	10,670	5,608	8,080	6,031	60.9	78.7
80,000	18	56,500	10,670	5,705	8,080	6,571	66.5	86.1
100,000	18	70,600	11,170	6,006	8,480	7,677	81.1	105.6
120,000	18	84,700	11,470	6,779	9,380	8,049	91.8	120.9

Tabla13. Características generador de vapor en función de la potencia Fuente: (13)

Anteriormente, se han calculado las pérdidas térmicas en todos los tanques.

$$Q_{total \text{ pérdidas térmicas}} = 7153,70 \text{ kW}$$

A continuación, se pasa de potencia térmica (kW/h) a (kg de vapor/h). Para realizar el cálculo, utilizaremos una regla de proporcionalidad mediante la Tabla13.

$$\frac{17600 \text{ kW}}{25000 \text{ kg} \frac{\text{kg vapor}}{\text{h}}} = \frac{70600 \text{ kW}}{100000 \text{ kg vapor /h}} = 0,70$$

$$\frac{70600 \text{ kW}}{100000 \text{ kg vapor /h}} = \frac{7153,70 \text{ kW}}{m_{\text{vapor}}}$$

$$\frac{70600 \text{ kW}}{100000 \text{ kg vapor /h}} = \frac{7153,70 \text{ kW}}{Q_{\text{pérdidas}}}$$

$$Q_{\text{pérdidas}} = \frac{7153,70 \text{ kW} \times 100000 \text{ kg vapor/h}}{70600 \text{ kW}}$$

$$Q_{\text{vapor}} = 10132,71 \text{ kg vapor/h}$$

Este valor es el caudal de vapor necesario por hora para compensar las pérdidas térmicas. Por lo tanto, el caudal másico de vapor necesario por hora será:

$$Q = Q_{\text{pérdidas}} + Q_{\text{bombas}}$$

$$Q = 10132,71 + 42339 = 52471,71 \text{ kg vapor/h}$$

El generador elegido tendrá una potencia de 38.800 kW y es capaz de generar 55000 kg/h de vapor. Con esta potencia, nos aseguramos de que el generador siempre generará el vapor necesario para cubrir todas las necesidades del buque.

Como ya se ha comentado anteriormente, todos los cálculos se han realizado dentro de unos requisitos de máxima necesidad de consumo de vapor, asociadas a unas condiciones externas y adversas.

8. Conclusiones

La primera parte del trabajo, se divide en tres apartados fundamentales para el estudio de un sistema de vapor. En el primero, se explican, específicamente, diversas formas de cómo se transmite el calor. En el segundo, se define vapor y se explican los diferentes tipos y en el último, se define qué es un generador de vapor y se explican, con detalle, todas sus partes. Este capítulo es fundamental para poder entender cómo funciona un sistema de vapor, puesto que nos ofrece una visión general de todos los conceptos necesarios para poder entender la esencia de este trabajo.

En la segunda parte, se ha realizado un cálculo de dimensionamiento de tanques y, a la vez, el cálculo de las pérdidas térmicas. Estos cálculos se han realizado de tal forma que el método no sólo sirva para un tipo de buque determinado, sino que pueda ser aplicable a todo tipo de buques y, también, se ha calculado el consumo de vapor y de las bombas de carga y descarga del buque. Una vez realizado el balance de vapor necesario, se ha podido determinar el área necesaria de serpentines de vapor que tenemos que colocar en los tanques.

Seguidamente, se realiza la elección del generador de vapor necesario para cubrir todas las necesidades del buque. Durante todos los cálculos, se han puesto unas condiciones externas muy desfavorables y, a la vez, unas condiciones de consumo máximo. De esta forma, se asegura que el generador de vapor elegido siempre será capaz de cubrir todas las necesidades de consumo de vapor del buque.

Para concluir, decir que la redacción del proyecto me ha permitido conocer cuáles son las necesidades principales de consumo de vapor de un buque y, también, conocer cómo se realiza y calcula todo el sistema de distribución y generación de vapor.

Bibliografía

- [1] Industrial Más Nieto S. A. Serpentes calefactores en aplicaciones marinas. Mas nieto, BS/80. [Visita: 20 Mayo 2019].
- [2] Manuel Arnaldos Martínez. (1998). Balance de vapor en buques con propulsión motor Diesel (I). Ingeniería Naval. [Visita: 20 Marzo 2019].
- [3] Mecanismos de transmisión del calor. (2013). 1a Edición. [pdf] Recuperado: [http://file:///E:/TFG/Mecanismos%20de%20transmisión%20de%20calor%20\(CONDUCCION,%20CONVECCION,%20RADIACION\).pdf](http://file:///E:/TFG/Mecanismos%20de%20transmisión%20de%20calor%20(CONDUCCION,%20CONVECCION,%20RADIACION).pdf) [Visita 7 Mayo 2019].
- [4] Real Academia Española. (2001). Diccionario de la lengua española (22.a ed.). Recuperado de: <http://www.rae.es/rae.html> [28/04/2019]
- [5] Significant Ships of 2016. (2017). 1st ed. Londres, pp.46-47.
- [6] Krause, P. (2017). *OPERATING CHARACTERISTICS OF THE CARGO TURBOPUMP*. [online] Recuperado de: http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-article-BAR0-0031-0011/c/httpwww_bg_utp_edu_plartpe32007pe32007121128.pdf [Accessed 9 Jun. 2019].
- [7] Prof. Ignacio Echevarrieta Sazatornil. (2018) Apuntes asignatura Generadores de Vapor.
- [8] Shinkohir.co.jp. (2019). *Products / Shinko Ind. Ltd.*. [online] Recuperado de: <http://www.shinkohir.co.jp/en/product.html> [Visita: 1 Mayo 2019].
- [9] User, S. (2019). *Ampco Pumps Company*. [online] Pump-manufacturers.com. Recuperado de: <http://www.pump-manufacturers.com/pump-applications/marine-pumps/367-ampco-pumps-company.html> [Visita 14 Mayo 2019].
- [10] Google.com. (2019). *suezmax oil pdf - Google Search*. [online] Available at: https://www.google.com/search?q=suezmax+oil+pdf&spell=1&sa=X&ved=0ahUKEwj_kryxg77iAhUIUBUIHbvDBpcQBQgpKAA&biw=1280&bih=864 [Visita 17 Junio 2019].
- [11] Schmitt-pumpen.de. (2019). *Schmitt Kreispumpen: Centrifugal Pumps for the Oil and Gas Industry*. [online] Recuperado de: <http://www.schmitt-pumpen.de/en/industries/centrifugal-pumps-for-the-oil-and-gas-industry.html#> [Visita 27 Abril 2019].

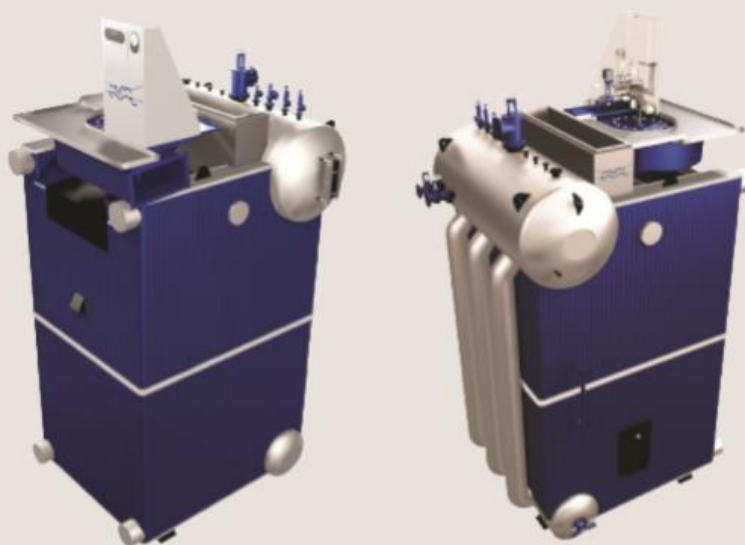
-
- [12] Vapor para la Industria. (2019). *Sistema de purga de líneas de vapor industrial*. [online] Recuperado de: <https://vaporparalaindustria.com/sistema-purga-lineas-vapor-industrial/> [Visita 9 Febrero 2019].
- [13] AlfaLaval (2019). *Oil/gas-fired steam boiler*. [online] Recuperado de: <https://www.alfalaval.com/products/heat-transfer/boilers/oil-gas-fired-steam-boiler/> [Visita 18 abril 2019].

Anexo 1. Características generador



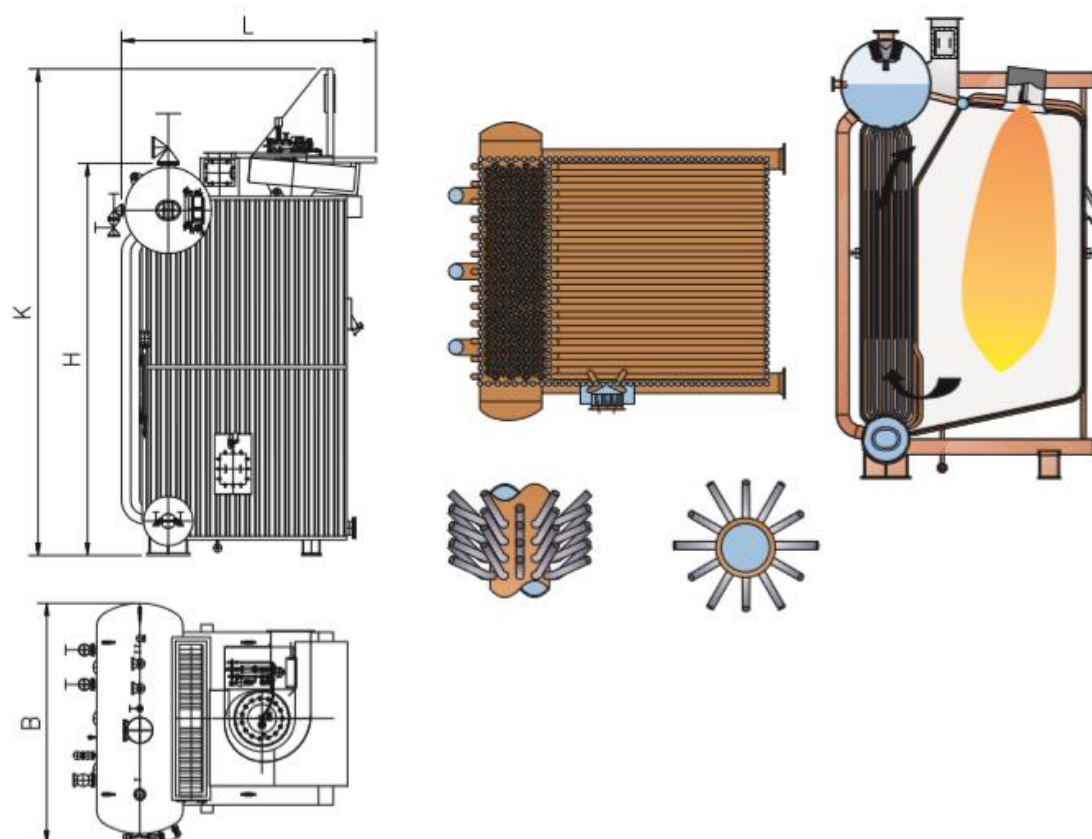
Aalborg D

High performance modular boiler plant



Aalborg D is a standard vertical two-drum boiler. The furnace is built of membrane walls and contains a minimum of refractory. The convection section consists of straight pin tubes with bent pins that provide a high heat transfer coefficient and low pressure loss. Circulation is ensured by downcomers arranged outside the furnace.

Capacity range: 25 – 120 t/h



Standard product range

Capacity and dimensions

Steam capacity	Design pressure	Thermal output at 100% MCR	Height K (incl retraction of burner lance)	Total length L	Height H	Width B (steam drum+200)	Boiler dry weight *)	Boiler operation weight
kg	bar (g)	kW	mm	mm	mm	mm	ton	ton
25,000	18	17,600	9,170	4,309	6,280	3,837	31.6	39.6
35,000	18	24,700	9,520	4,583	6,980	4,187	38.2	48.8
45,000	18	31,800	9,870	5,050	8,080	4,875	44.2	57.0
55,000	18	38,800	10,370	5,413	8,480	5,131	50.8	65.7
70,000	18	49,400	10,670	5,608	8,080	6,031	60.9	78.7
80,000	18	56,500	10,670	5,705	8,080	6,571	66.5	86.1
100,000	18	70,600	11,170	6,008	8,480	7,877	81.1	105.6
120,000	18	84,700	11,470	6,779	9,380	8,049	91.8	120.9

*) boiler dry weight incl. burner, insulation, valves, and refractory